

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DO RUÍDO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS E DE SISTEMAS
DE REFRIGERAÇÃO ATRAVÉS DA QUALIDADE SONORA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RAFAEL AUGUSTO DOS SANTOS NUNES

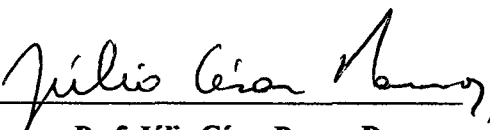
FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2001

**AVALIAÇÃO DO RUÍDO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS E DE
SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO ATRAVÉS DA QUALIDADE SONORA**

RAFAEL AUGUSTO DOS SANTOS NUNES

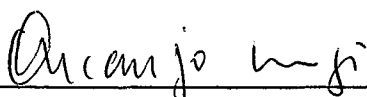
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI CONSIDERADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO VIBRAÇÕES E
ACÚSTICA, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**



Prof. Júlio César Passos, Dr.

Coordenador



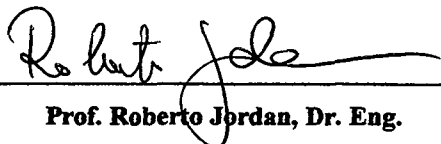
Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.

Orientador


BANCA EXAMINADORA:



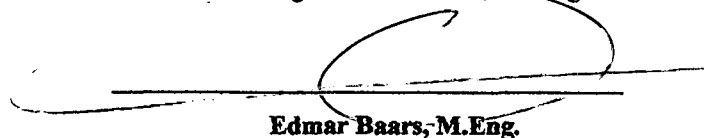
Prof. Samir N. Y. Gerges, Ph.D.



Prof. Roberto Jordan, Dr. Eng.



Prof. Jorge da Silva Pinto, Dr. Eng.



Edmar Baars, M.Eng.

*Agradeço aos meus pais Valentin e Bernadet e aos meus irmãos
Patrícia e Gustavo pelo apoio e amor incondicionais.*

À minha noiva Danielle pelo incentivo e carinho nas horas difíceis.

E pelas orações e presença à minha avó Zelmina e minha tia Eroni.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| Glossário..... | vi |
| Lista de figuras e tabelas | vii |
| Resumo..... | xvi |
| Abstract..... | xvii |
| | |
| 1 Introdução..... | 1 |
| 2 Métricas da psicoacústica..... | 8 |
| 2.1 Curva de ponderação A..... | 9 |
| 2.2 Mascaramento..... | 10 |
| 2.2.1 Efeitos temporais..... | 14 |
| 2.3 Loudness..... | 17 |
| 2.3.1 Determinação dos valores de “loudness”..... | 20 |
| 2.4 Sharpness..... | 26 |
| 2.5 Fluctuation strength..... | 28 |
| 2.6 Roughness..... | 30 |
| 2.7 Métricas de tom puro..... | 33 |
| 3 Desenvolvimento da metodologia de avaliação subjetiva pela análise de júri..... | 36 |
| 3.1 Ajuste da sala de análise subjetiva..... | 37 |
| 3.2 Seleção das fontes para análise..... | 44 |
| 3.3 Gravação dos sinais..... | 44 |
| 3.4 Reprodução e composição dos sinais para a avaliação de júri..... | 47 |
| 3.4.1 Apresentação direta e vias de reprodução digital..... | 48 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.4.2 | Composição dos grupos e tempos de reprodução..... | 50 |
| 3.5 | Seleção do júri e composição do questionário | 53 |
| 3.6 | Apresentação dos ruídos aos jurados e análise dos resultados | 56 |
| 4 | Aplicação do conceito de qualidade sonora em compressores e sistemas de refrigeração..... | 59 |
| 4.1 | Avaliação dos compressores..... | 63 |
| 4.2 | Avaliação dos sistemas de refrigeração..... | 81 |
| 4.2.1 | Resultados de nível de pressão sonora e “loudness” | 81 |
| 4.2.2 | Resultados das avaliações de júri | 87 |
| 4.3 | Correlação das respostas dos compressores com as respostas dos sistemas de refrigeração..... | 101 |
| 5. | Conclusões e sugestões para trabalhos futuros..... | 115 |
| 6. | Referências bibliográficas | 120 |
| Anexo 1 | - Exemplo de questionário utilizado para avaliação de sistemas de refrigeração | 122 |
| Anexo 2 | - Questionário de avaliação utilizado na Embraco | 125 |
| Anexo 3 | - Gráficos de “loudness” com escalas de frequência em Hz..... | 130 |

GLOSSÁRIO

O objetivo deste glossário é o de esclarecer os termos que definem as métricas da psicoacústica, mas que não possuem uma tradução normalizada nas publicações brasileiras, sendo mantidas no texto os termos originais em inglês para facilitar o entendimento de outras referências sobre o tema.

“loudness” : sonoridade ou audibilidade.

“sharpness” : agudeza.

“fluctuation strength” : intensidade da flutuação.

“roughness” : aspereza.

“proeminence ratio” : razão de proeminência.

“tone-to-noise ratio” : razão de tom para ruído.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figuras

- Figura 2.1** – Banda crítica em função da frequência. Aproximações para faixas de baixas e altas frequências são indicadas pelas linhas pontilhadas. [6]..... 8
- Figura 2.2** – Curva formada pela relação entre a escala de banda crítica em Bark e a frequência em kHz..... 9
- Figura 2.3** – Curva de ponderação A. [4]..... 10
- Figura 2.4** – Nível de um tom de teste mascarado por um ruído branco para um dado nível de densidade l_{WN} , em função da frequência do tom de teste. A curva pontilhada indica o limiar da audição. [6]..... 12
- Figura 2.5** – Nível do tom de teste mascarado por um ruído de banda crítica com nível de 60 dB e frequências centrais de 0,25 kHz, 1 kHz e 4 kHz. [6]..... 13
- Figura 2.6** – Nível do tom de teste mascarado por um ruído de banda crítica com frequência central de 1 kHz em diferentes níveis em relação a frequência do tom de teste. [6]..... 13
- Figura 2.7** – Desenho esquemático caracterizando as regiões de pré-mascaramento, pós-mascaramento e mascaramento simultâneo, onde o pós-mascaramento utiliza uma origem diferente dos demais. [6]..... 14
- Figura 2.8** – O pós-mascaramento depende do tempo de duração do mascarador: níveis de tons de teste pontuais just-audible são indicados em função dos seus tempos de atraso após o desligamento dos mascaradores com 200 ms e 5 ms de duração. O nível do ruído de mascaramento uniforme é 60 dB; a duração do tom de teste de 2 kHz é de 5 ms. O tempo de atraso é o tempo entre o final do mascarador e o final do tom de teste. [6]..... 16

| | |
|---|----|
| Figura 2.9 – Linhas de igual-sonoridade para tons puros em campo livre. Os parâmetros são expressos em nível de “loudness”, L_N , e “loudness”, N . [6]..... | 18 |
| Figura 2.10 – Atenuação, a_D , necessária para produzir o mesmo igual-sonoridade para um tom puro em campo difuso e em campo livre em função da frequência do tom puro. [6]..... | 18 |
| Figura 2.11 – Nível de incremento (ou decremento) necessário para produzir o dobro (ou a metade) do “loudness” de um tom de 1 kHz em função do seu nível. [6]..... | 20 |
| Figura 2.12 – Gráfico para determinação dos valores de “loudness” index para cálculo do “loudness” pelo método de Stevens. [11]..... | 23 |
| Figura 2.13 – Exemplo de gráfico utilizado para determinação do “loudness” pelo método de Zwicker. [11]..... | 26 |
| Figura 2.14 – “Sharpness” de ruídos de banda larga, estreita e com largura de banda crítica em função da frequência central (linha sólida), de ruídos passa banda com frequência de corte superior de 10 kHz em função da frequência de corte inferior (tracejada) e um ruído passa banda com frequência de corte inferior de 0.2 kHz em função da frequência de corte superior (pontilhada). O nível de “loudness” dos ruídos é de 60 phon. [6]..... | 27 |
| Figura 2.15 – “Fluctuation strength” de três ruídos modulados em função da modulação em frequência. Painel (a): ruído de banda larga com amplitude modulada com 60 dB de nível de pressão sonora e 40 dB de intensidade de modulação; (b): tom de 1kHz com amplitude modulada com 70 dB de nível de pressão sonora e 40 dB de intensidade de modulação; (c): tom puro com frequência modulada com 70 dB de nível de pressão sonora, frequência central de 1500 Hz e ± 700 Hz de desvio de frequência. [6]..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.16 – “ <i>Roughness</i> ” em relação do grau de modulação para um tom de 1 kHz, com amplitude modulada numa frequência de 70 Hz. A linha tracejada indica uma aproximação linear da relação. [6] | 31 |
| Figura 2.17 – “ <i>Roughness</i> ” de tons com amplitude modulada em 100 % das frequências centrais em relação a frequência de modulação. [6]..... | 32 |
| Figura 2.18 – “ <i>Roughness</i> ” de três sons modulados em função da frequência de modulação. (a): Ruído de banda larga com amplitude modulada e nível de pressão sonora de 60 dB e intensidade de modulação de 40 dB; (b) Tom de 1 kHz com 70 dB de nível de pressão sonora e 40 dB de intensidade de modulação; (c) tom puro com frequência modulada com 70 dB de nível de pressão sonora, frequência central de 1500 Hz e ± 700 de desvio de frequência. [6]..... | 33 |
| Figura 2.19 - Representação do conceito do “ <i>proeminence ratio</i> ”, sendo W_c a potência da banda crítica em torno do tom puro e W_I e W_U as potências das bandas críticas adjacentes. [3]..... | 34 |
| Figura 2.20 - Representação do conceito do “ <i>tone-to-noise ratio</i> ”, sendo W_t o nível de pressão sonora do tom puro em si e W_n o nível de pressão sonora da banda com largura de banda crítica com a ausência do tom puro. [3]..... | 34 |
| Figura 3.1 – Esquema com a seqüência adotada para o desenvolvimento da metodologia para a análise de júri..... | 37 |
| Figura 3.2 – Tempo de decaimento na banda de 2 kHz, este mesmo gráfico foi gerado para todas as bandas de 100 Hz a 10 kHz..... | 39 |
| Figura 3.3 - Tempo de reverberação médio das cozinhas medidas..... | 39 |
| Figura 3.4 - Tempos de reverberação da sala de análise subjetiva em relação aos tempos de reverberação médio das cozinhas | 40 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 3.5 - Painel de absorção com placa rígida..... | 41 |
| Figura 3.6 - Painel de absorção com placa perfurada..... | 42 |
| Figura 3.7 - Tempo de reverberação da sala de análise subjetiva, valores médios das cozinhas e o calculado com os painéis. | 43 |
| Figura 3.8 - Painéis instalados na sala de análise subjetiva. | 43 |
| Figura 3.9 - Função transferência do sistema de captação binaural do Manikin MK 1 Cortex (torso) em campo difuso. | 46 |
| Figura 3.10 - Fotos do Manikin MK1 Cortex (torso) e detalhes da cabeça, orelha e posicionamento do microfones. | 46 |
| Figura 3.11 – Exemplo do posicionamento do Manikin MK1 Cortex (torso) para a gravação de um sistema de refrigeração. | 47 |
| Figura 3.12 – Resposta em frequência de uma caixa acústica com três alto falantes em uma câmara anecóica. [11]..... | 49 |
| Figura 3.13 – (a) Resposta em frequência de uma caixa de som numa sala de estar (linha sólida) e numa câmara anecóica (linha pontilhada). O painel (b) mostra, em escala expandida, a resposta na sala de estar. [11]..... | 50 |
| Figura 3.14 - Comparação de avaliações da fidelidade de caixas acústicas sem a apresentação da forma (oculto) e com a apresentação da forma (visível) das mesmas. [2]..... | 57 |
| Figura 4.1 - Fluxograma representando a cadeia de medição utilizada no experimento. ... | 60 |
| Figura 4.2 - Esquema da distribuição dos equipamentos na sala de análise subjetiva..... | 61 |
| Figura 4.3 - Nível de pressão sonora (NPS) do compressor C1, em bandas de 1/3 de oitava. | 64 |
| Figura 4.4 - “Loudness” do compressor C1..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.5 - Nível de pressão sonora (NPS) do compressor C2, em bandas de 1/3 de oitava..... | 65 |
| Figura 4.6 - “ <i>Loudness</i> ” do compressor C2..... | 66 |
| Figura 4.7 - Nível de pressão sonora (NPS) do compressor C3, em bandas de 1/3 de oitava..... | 67 |
| Figura 4.8 - “ <i>Loudness</i> ” do compressor C3..... | 67 |
| Figura 4.9 - Nível de pressão sonora (NPS) do compressor C4, em bandas de 1/3 de oitava..... | 68 |
| Figura 4.10 - “ <i>Loudness</i> ” do compressor C4..... | 69 |
| Figura 4.12 - Comparação entre a resposta do júri e os valores em dB e dB(A). | 70 |
| Figura 4.13 - Comparação entre as respostas do júri e os resultados do “ <i>loudness</i> ” e do “ <i>sharpness</i> ”..... | 71 |
| Figura 4.14 - Comparação entre a resposta do júri e as do “ <i>tone-to-noise ratio</i> ” (dB) e do “ <i>prominence ratio</i> ” (dB)..... | 71 |
| Figura 4.15 - Comparação entre a resposta do júri e as do “ <i>roughness</i> ” (asper) e “ <i>fluctuation strength</i> ” (vacil)..... | 72 |
| Figura 4.16 - Comparação entre os espectros de ruído dos compressores C2 e C3..... | 73 |
| Figura 4.17 - Comparação entre os “ <i>loudness</i> ” dos compressores C2 e C3..... | 74 |
| Figura 4.18 - Comparação entre os espectros de ruído dos sinais do compressor C3 e C3 Alterado..... | 75 |
| Figura 4.19 - Comparação entre os “ <i>loudness</i> ” do compressor C3 e C3 com alteração digital..... | 75 |
| Figura 4.20 - Comparação entre os espectros de ruído dos compressores C2 e C3 com alteração digital..... | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.21 - Comparação entre os “ <i>loudness</i> ” do compressor C2 e C3 com alteração digital..... | 77 |
| Figura 4.22 - Resultado da avaliação de júri utilizando o sinal do compressor C3 com alteração digital. | 77 |
| Figura 4.23 - Comparação da avaliação do júri com as respostas em dB e em dB(A). ... | 78 |
| Figura 4.24 - Comparação da avaliação do júri com as métricas do “ <i>loudness</i> ” e do “ <i>sharpness</i> ”..... | 79 |
| Figura 4.25 - Comparação da avaliação do júri com as métricas do “ <i>tone-to-noise ratio</i> ” e “ <i>proeminence ratio</i> ”. | 79 |
| Figura 4.26 - Comparação da avaliação do júri com as métricas “ <i>roughness</i> ” e “ <i>fluctuation strength</i> ”. | 80 |
| Figura 4.27 - Nível de pressão sonora (NPS) do sistema de refrigeração S1, em bandas de 1/3 de oitava..... | 82 |
| Figura 4.28 - “ <i>Loudness</i> ” do sistema de refrigeração S1. | 83 |
| Figura 4.29 - Nível de pressão sonora (NPS) do sistema de refrigeração S2, em bandas de 1/3 de oitava..... | 83 |
| Figura 4.30 - “ <i>Loudness</i> ” do sistema de refrigeração S2. | 84 |
| Figura 4.31 - Nível de pressão sonora (NPS) do sistema de refrigeração S3, em bandas de 1/3 de oitava..... | 84 |
| Figura 4.32 - “ <i>Loudness</i> ” do sistema de refrigeração S3. | 85 |
| Figura 4.33 - Nível de pressão sonora (NPS) do sistema de refrigeração S4, em bandas de 1/3 de oitava..... | 86 |
| Figura 4.34 - “ <i>Loudness</i> ” do sistema de refrigeração S4. | 86 |
| Figura 4.35 - Avaliação do júri com sistema real nos três instantes da análise. | 87 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.36 - Avaliação do júri com sistema digital nos três momentos de análise. | 88 |
| Figura 4.37 - Avaliação de júri digital do funcionamento do sistema. | 89 |
| Figura 4.38 - Comparação da avaliação do júri com os níveis em dB e dB(A). | 90 |
| Figura 4.39 - Comparação da avaliação do júri com o “ <i>loudness</i> ” e com o “ <i>sharpness</i> ”. | |
| ..... | 90 |
| Figura 4.40 - Comparação da avaliação do júri com o “ <i>roughness</i> ” e com o “ <i>fluctuation strength</i> ” | |
| ..... | 91 |
| Figura 4.41 - Comparação da avaliação do júri com o “ <i>tone-to-noise ratio</i> ” e com o “ <i>proeminence ratio</i> ”. | |
| ..... | 92 |
| Figura 4.42 - Comparação da avaliação dos jurados dos sistemas de refrigeração no funcionamento na apresentação direta e na apresentação digital, via fones de ouvido. | |
| ..... | 93 |
| Figura 4.43 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) dos sistemas de refrigeração S3 e S1. | |
| ..... | 94 |
| Figura 4.44 - Comparação do “ <i>loudness</i> ” dos sistemas de refrigeração S3 e S1. | |
| ..... | 94 |
| Figura 4.45 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) dos sistemas de refrigeração S1 e S1 Alterado digitalmente. | |
| ..... | 95 |
| Figura 4.46 - Comparação do “ <i>loudness</i> ” dos sistemas de refrigeração S1 e S1 Alterado digitalmente. | |
| ..... | 96 |
| Figura 4.47 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) dos sistemas de refrigeração S3 e S1 Alterado digitalmente. | |
| ..... | 96 |
| Figura 4.48 - Comparação do “ <i>loudness</i> ” dos sistemas de refrigeração S3 e S1 Alterado digitalmente. | |
| ..... | 97 |
| Figura 4.49 - Resposta da avaliação do júri com o sistema de refrigeração S1 alterado. | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.50 - Comparação da avaliação do júri com os níveis em dB e dB(A). | 98 |
| Figura 4.51 - Comparação da avaliação do júri com as métricas “loudness” e “sharpness” | 99 |
| Figura 4.52 - Comparação da avaliação do júri com as métricas “roughness” e “fluctuation strength” | 99 |
| Figura 4.53 - Comparação da avaliação do júri com as métricas “tone-to-noise ratio” e “proeminence ratio” | 100 |
| Figura 4.54 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) do compressor C1 e do sistema de refrigeração S1 | 102 |
| Figura 4.55 - Comparação do “loudness” do compressor C1 e do sistema de refrigeração S1 | 102 |
| Figura 4.56 - Comparação do nível de pressão sonora do compressor C2 e do sistema de refrigeração S2 | 103 |
| Figura 4.57 - Comparação do “loudness” do compressor C2 e do sistema de refrigeração S2 | 103 |
| Figura 4.58 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) do compressor C3 e do sistema de refrigeração S3 | 104 |
| Figura 4.59 - Comparação do “loudness” do compressor C3 e do sistema de refrigeração S3 | 105 |
| Figura 4.60 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) do compressor C4 e do sistema de refrigeração S4 | 106 |
| Figura 4.61 - Comparação do “loudness” do compressor C4 e do sistema de refrigeração S4 | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.62 - Relação da análise de júri dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração..... | 107 |
| Figura 4.63 - Relação do valor do “ <i>loudness</i> ” dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração..... | 108 |
| Figura 4.64 - Relação do valor do “ <i>sharpness</i> ” dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração..... | 108 |
| Figura 4.65 - Relação do valor do “ <i>roughness</i> ” dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração..... | 109 |
| Figura 4.66 - Relação do valor do fluctuation strenght dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração..... | 109 |
| Figura 4.67 - Relação do valor do “ <i>tone-to-noise ratio</i> ” dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração. | 110 |
| Figura 4.68 - Relação do valor do “ <i>proeminence ratio</i> ” dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração. | 110 |
| Figura 4.69 - Relação do nível em dB dos compressor/sistema de refrigeração..... | 111 |
| Figura 4.70 - Relação do nível em dB(A) dos compressor/sistema de refrigeração..... | 111 |
| Figura 4.71 - Número de respostas dadas pelos 15 jurados em relação às questões com respostas estimuladas dos questionários dos itens de componentes graves e agudos. | 112 |
| Figura 4.72 - Número de respostas dadas pelos 15 jurados em relação às questões com respostas estimuladas dos questionários dos itens de componentes modulados e de tons puros..... | 113 |

Tabelas

| | |
|---|-----------|
| Tabela 4.1-Dados sócio-econômicos dos jurados..... | 63 |
|---|-----------|

RESUMO

Com o crescimento da necessidade de redução e controle da emissão de ruído, em função de normas nacionais e internacionais que fixaram patamares máximos, ou da concorrência entre produtos, em que a emissão de ruído em alguns casos é um fator determinante, percebeu-se que apenas os valores ponderados de acordo com a curva de ponderação A (dB(A)) não caracterizavam o ruído de maneira completa.

A curva dB(A), é utilizada para aproximar os valores de ruídos medidos com a forma na qual o sistema auditivo responde, porém, ela apenas informa como ocorre a transmissão de energia do sinal, não informando nuances como características de mascaramento ou modulações no sinal.

Com o desenvolvimento da psicoacústica foram criados parâmetros que caracterizam o som na forma como ele é percebido pelo sistema auditivo humano, sendo estes parâmetros mais precisos pois consideram as nuances de alta e baixa frequência, bem como modulações, mascaramento e ocorrência de tons puros.

O primeiro passo para o controle do ruído emitido pelo produto é a definição de qual a característica do mesmo que mais causa incômodo ao consumidor, sendo este o principal alvo da qualidade sonora, que pretende determinar quais são estas características e como avaliá-las de forma objetiva.

Assim, a qualidade sonora é uma ferramenta para a avaliação subjetiva de ruídos que abrange um conjunto de procedimentos envolvendo a forma para a coleta dos sinais, a análise com os parâmetros da psicoacústica, a definição de como se formar os júris para cada situação, a análise final dos resultados e a recomendação de alterações em função dos resultados.

Estas etapas foram definidas focadas no conjunto compressor/sistema de refrigeração, sendo apresentadas as formas de desenvolvimento de cada etapa e a aplicação da ferramenta em um conjunto, mostrando que esta ferramenta pode ser também eficiente fora da área automotiva, principal foco de utilização da mesma hoje.

ABSTRACT

With the increase in need of reduction and control of noise emissions, in consideration of the maximum levels stated by national and international normalizations, or by the competition among products, where the noise emission in some cases are a decisive factor, was noticed that just the values pondered by the A curve (dB(A)) didn't characterize the noise in a complete way.

The curve dB(A) is used to proximate the measured noise values with the form in which the auditory system answers, but it just informs how the energy transmission of the signal happens, not informing nuances as masking characteristics or modulations in the signal.

With the development of the psicoacoustics, parameters were created to characterize the sound in the form how it is noticed by the human auditory system, being these more precise parameters because they consider the nuances of the lower and high frequencies, as well as modulations, masking and the occurrence of pure tones.

The first step to control of the noise emitted by the product is the definition of which characteristic is the most uncomfortable to the consumer, being this the main objective of the sound quality, which intends to determine which are these characteristics and to evaluate them in an objective way.

Thus, the sound quality is a tool for the subjective evaluation of noises that embraces a group of procedures involving the form of signal acquisition, the analysis of the psicoacoustics parameters, the definition of how to form the juries for each situation, the final analysis of the results and the recommendation of alterations in function of these results.

These stages were defined thinking in the group compressor/refrigeration system, being presented the forms of development of each stage and the application of the tool in the group, showing that this tool can also be efficient out of the automotive area, the main focus of its today.

1 INTRODUÇÃO

Qualidade sonora de um produto representa um conceito que agrupa vários outros, que expressam reações subjetivas do ruído, tornando a sua definição uma tarefa difícil devido às muitas áreas de aplicação. A definição mais comumente aceita pelos estudiosos desta área de qualidade sonora é a seguinte: “Qualidade sonora é a reação perceptiva ao som de um produto que reflete a reação do ouvinte de quanto satisfatório o som do produto é: o mais satisfatório, a melhor qualidade sonora.”[14]. Assim, mantendo sempre em mente esta definição pode se compreender melhor as nuances que compõem este conceito.

Os sons traduzem o significado e as atribuições referentes a cada produto, sendo que através da combinação das diversas componentes dos sons de produtos tem-se o resultado final percebido pelos consumidores, sendo o objetivo das empresas atuar sobre estes ruídos complexos de forma a torná-los mais aceitáveis.

Um dos conceitos físicos mais básicos utilizado para aproximar a percepção humana do ruído, e assim estudá-lo e otimizá-lo, é a curva de ponderação A ($dB(A)$), que aproxima os valores de ruídos medidos com a forma na qual o sistema auditivo responde. Porém, a curva $dB(A)$ apenas informa como ocorre a transmissão de energia do sinal, não informando nuances como características de mascaramento nos domínios do tempo e da frequência ou modulações no sinal, surgindo daí a necessidade de uma ferramenta que supra tais deficiências, que são agrupadas no conceito de qualidade sonora.

Um exemplo claro das diferenças encontradas com a aplicação simples da curva $dB(A)$ é o experimento realizado utilizando-se 4 sistemas de refrigeração com mesmos níveis de ruído $dB(A)$, mas que apresentaram diferenças quando apresentados a jurados, tornando clara a limitação da curva $dB(A)$ em relação à nuances específicas dos ruídos.

Um dos motivos é o reconhecimento pelas empresas da importância da relação do ruído emitido pelos produtos com seus consumidores, sendo o exemplo mais atual desta relação a solicitação do registro de patente pela Harley-Davidson Company do ruído emitido pelas motocicletas que fabrica, já que o mesmo é reconhecidamente uma das características que mais se destaca no conjunto da motocicleta.

Outro exemplo claro desta necessidade vem de um fabricante de aspiradores de pó, que desenvolveu um produto com maior capacidade de aspiração que os demais, porém com um nível de ruído muito menor.

Para surpresa da empresa as vendas foram baixíssimas, e após análise descobriu-se que os consumidores, ao utilizarem o aspirador de pó e não ouvir o ruído alto durante o seu funcionamento, acabavam considerando que o mesmo não correspondia à capacidade informada pelo fabricante.

Casos, como o da Harley-Davidson e do fabricante de aspiradores de pó, mostram que a aplicação dos conceitos da qualidade sonora não objetivam apenas a redução da intensidade do ruído, buscando o nível zero de ruído no produto, mas também a construção de características que criem uma identidade própria para o mesmo.

Mas não são apenas estas características nos produtos que levam à busca da aplicação do conceito de qualidade sonora, pois características que forneçam ao consumidor indicações de potência, vigor, ou até mesmo de que o produto possa vir a falhar podem ser incluídos ou eliminados, para que surjam no momento apropriado.

Quanto à característica de um ruído ser apropriado ou não à cada situação é bem representada pelo estudo sobre a reação ao ruído de auto-estradas em Los Angeles que mostrou uma correlação negativa entre o som e o incômodo aos residentes.

Aquelas pessoas que viviam distantes da auto-estrada em vizinhanças silenciosas se opuseram mais fortemente ao ruído fraco que ouviam da auto-estrada porque imaginavam que era inapropriado para a sua situação, enquanto aqueles que viviam próximos da auto-estrada esperavam a ocorrência daquele som e se opunham menos. Não se reage da mesma forma ao som do vizinho amigável cortando a sua grama por um lado, e dos motociclistas invadindo uma silenciosa rua suburbana por outro lado, mesmo se os sons produzidos por ambos sejam os mesmos, em intensidade.

Sons, conseqüentemente, possuem a habilidade de dar prazer ou de causar incômodo, interferir nas atividades diárias e até mesmo causar danos à audição. Mas não se pode esquecer da função maior do som que é utilizada o tempo todo: transmitir informações entre as pessoas, rádio e TV, e das características dos produtos utilizados no dia a dia.

O som surdo de um pneu é um exemplo que informa se ele está vazio e se o mesmo está sendo danificado. Porém, se todos os sons dos produtos pudessem ser desenvolvidos, provavelmente sons como beeps, campainhas e cliques que informem ao usuário que funções o produto está desenvolvendo deverão ser adicionados.

A determinação destes fatores de incomodidade ou não do ruído dos produtos pode ser realizada de diversas formas, utilizando-se de telefonemas e cartas aos consumidores ou através de grupos de foco, que são consultados pelas empresas para testar as características dos produtos projetados, sendo que estes contribuem aos programas de qualidade sonora pois auxiliam a estimar a importância do som em comparação com outros atributos como a cor, formato, facilidade de manuseio, preço, entre outros. Deve-se atentar, porém, ao fato de que grupos de foco não são utilizados para a determinação de quanto o ruído deve ser mais agradável, sendo esta função exercida pelas análises de júri.

Para a avaliação da incomodidade dos ruídos, ou otimização das suas características, aplicam-se os conceitos da psicoacústica, aliados à análise de júri. A psicoacústica é um ramo da psicologia experimental que estuda e identifica as correlações entre os estímulos físicos do som e as reações ou percepções das pessoas ao som. Numa forma mais restrita ela também diz respeito à relação entre as percepções e a fisiologia do sistema nervoso, sendo a sua principal forma de coleta de dados a análise de júri.

Já a análise de júri envolve a apresentação de uma série de sons a um conjunto de ouvintes e pedir a eles que façam julgamentos em relação aos sons, devendo-se porém os experimentos serem construídos cuidadosamente de forma que os resultados tenham validade estatística.

Um dos exemplos de aplicação da análise de júri para o desenvolvimento da psicoacústica é o julgamento do loudness de tons, sendo que estes testes produziram as curvas de Fletcher-Munson de mesmo "*loudness*". A percepção do "*loudness*" é um dos grandes referenciais na psicoacústica, tanto que a escala física do loudness é utilizada quase universalmente para prever como os ouvintes irão julgar o loudness dos produtos.

Além do "*loudness*" a predição do mascaramento, que é o encobrimento de um som sobre o outro, é outra métrica bastante conhecida. Uma importante aplicação do mascaramento é na interferência da fala, podendo-se prever com boa precisão o quanto a compreensão da fala será prejudicada pelo ruído de fundo num avião, num restaurante ou numa sala de leitura baseados num teste de júri de mascaramento e percepção da fala.

Através destes e outros conceitos da psicoacústica, do uso da análise de júri e do desenvolvimento tecnológico é possível, hoje, desenvolver o ruído de produtos através de simulação digital, criando produtos ditos virtuais, possibilitando alterações ainda na fase de concepção dos mesmos, ou em produtos já desenvolvidos otimizando suas respostas, sem a

necessidade de protótipos, permitindo a realização de análises de júri para verificação do impacto das alterações sobre os consumidores.

As diferenças mais sérias encontradas nos resultados obtidos através das análises de júri são a tendência no uso de júris experientes. O uso destes júris experientes ocorre em maior escala em empresas onde a investigação dos ruídos é um dos principais objetivos, principalmente porque estas avaliações normalmente não refletem a opinião da média dos consumidores dos produtos.

Embora ouvintes experientes possam dar um diagnóstico melhor do som, prefere-se utilizar consumidores como jurados, pois jurados internos das empresas podem estar envolvidos em um problema específico ou tecnológico, ou simplesmente influenciados por seus conhecimentos detalhados dos mecanismos envolvidos, distorcendo assim as avaliações por se focarem em pontos específicos do ruído dos produtos.

Um exemplo prático foi uma avaliação a respeito do fluxo de ar em torno de um espelho externo de um automóvel para julgar o seu ruído interno, as respostas do júri interno não corresponderam à da média dos consumidores.

Considerando todos estes aspectos da qualidade sonora, esta ferramenta vem se aliar às demais conhecidas e aplicadas para o desenvolvimento dos compressores visando otimizar ainda mais as suas características de qualidade. Isto se justifica também pela grande importância que o ruído adquiriu como fator diferencial entre os fabricantes de compressores.

Esta importância tem como base também o maior senso crítico dos consumidores em relação ao ruído, sendo que em alguns mercados consumidores, os compradores exigem que os sistemas de refrigeração sejam ligados na sua presença para que possam avaliar a emissão de ruído, sendo peça primordial nesta avaliação o ruído do compressor.

As técnicas tradicionais de medição, como a medição de níveis de pressão sonora (NPS) e de potência sonora (NWS), tem apresentado limitações no que diz respeito à avaliação das sensações que os ruídos provocam nos consumidores.

Estes métodos tem sido a referência por muito tempo dos fabricantes de sistemas de refrigeração, porém estas referências tem se mostrado muito próximas para diferentes fornecedores, o que tem levado os fabricantes de sistemas de refrigeração a adotar avaliadores subjetivos para determinarem qual realmente o compressor mais adequado aos seus consumidores.

Além disto, a aplicação dos conceitos de qualidade sonora são também utilizados como ferramenta para guiar a otimização dos compressores em si, o que leva os projetistas de compressores a se utilizar destes conceitos cada vez mais. Esta otimização é guiada pelos experimentos com análises de júri, que possibilitam determinar as suas preferências com as métricas da psicoacústica, que então poderão ser utilizadas pelos projetistas como forma de prever as reações dos consumidores mesmo na fase de projeto.

Baseado nesta necessidade este trabalho visa a determinação das necessidades para o desenvolvimento do método da qualidade sonora, quais os conceitos necessários, a estrutura física para medições, como salas com características especiais, equipamentos necessários para as medições e suas especificações.

Além disso objetivou-se a determinação dos procedimentos para a composição das análises de júri, que fornecerão os resultados para a determinação das correlações com as métricas da psicoacústicas. Estes procedimentos consistem na elaboração dos questionários, formas de determinação dos componentes do júri, formas de apresentação dos sinais e análises dos resultados.

Partindo-se daí, no capítulo 2 estão descritas as métricas da psicoacústica mais utilizadas atualmente pelo conceito de qualidade sonora com suas definições e curvas determinadas pelos estudiosos da psicoacústica.

No capítulo 3 estão descritos os procedimentos desenvolvidos para a aplicação do conceito de qualidade sonora, sendo também descritos os passos para o ajuste da infraestrutura laboratorial existente e os conceitos para gravação, reprodução e avaliação dos resultados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados da aplicação do conceito de qualidade sonora para a avaliação de compressores e sistemas de refrigeração, bem como a aplicação de softwares específicos para a qualidade sonora e a alteração dos sinais originais.

No capítulo 5 estão as conclusões do trabalho e sugestões para o desenvolvimento de outros trabalhos.

2 MÉTRICAS DA PSICOACÚSTICA

A psicoacústica é um ramo da acústica que se dedica ao estudo das correlações entre as características físicas do som e as reações subjetivas ocasionadas pelo mesmo, advindo daí métricas capazes de mensurar estas correlações.

Para que a compreensão das métricas de psicoacústica seja completa necessita-se do pleno entendimento do conceito de banda crítica, que forma a base para o desenvolvimento dos parâmetros psicoacústicos, e é definido como uma banda com valores de largura de banda com cerca de 100 Hz abaixo de 500 Hz e de $(0,2 \cdot f)$ para frequências acima de 500 Hz, estas larguras de bandas são baseadas no fato de que o sistema auditivo humano analisa espectros largos em segmentos que correspondem às bandas críticas.

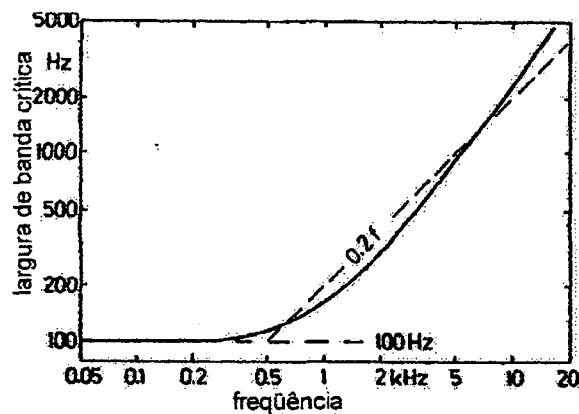


Figura 2.1 – Banda crítica em função da frequência. Aproximações para faixas de baixas e altas frequências são indicadas pelas linhas pontilhadas. [6]

A partir dos valores definidos de banda crítica pode-se definir os valores da escala de taxa de banda crítica, daí, adicionando uma banda crítica à próxima de forma que o limite superior da banda crítica anterior corresponda ao limite inferior da próxima, acaba por se formar a escala de taxa de banda crítica.

Para a determinação da escala de banda crítica determinaram-se as relação entre as bandas críticas e suas respectivas frequências, de 0 Hz a 16 kHz, ou seja, toda a faixa audível, resultando em uma seqüência de 24 pontos, que unidos acabam por formar a curva mostrada na Figura 2.2.

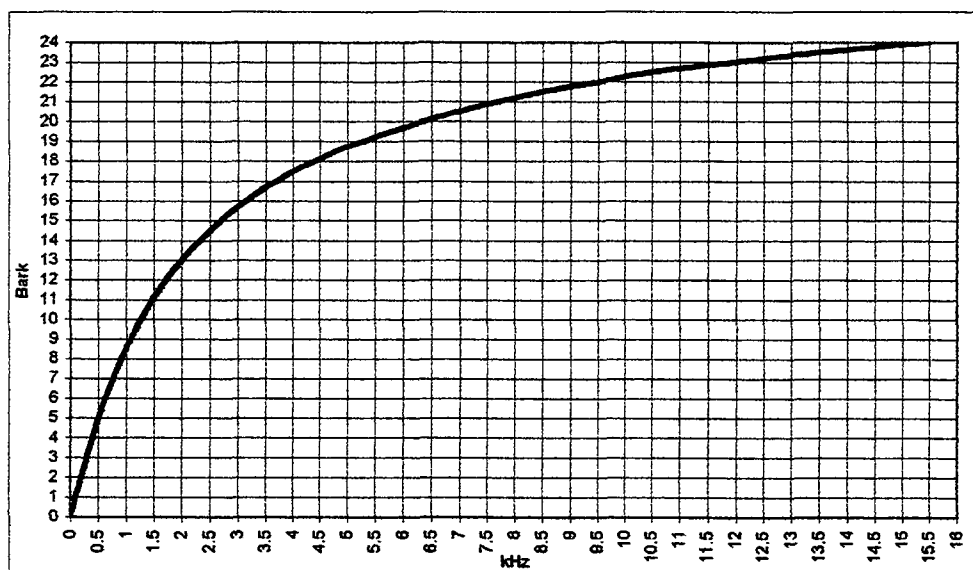


Figura 2.2 – Curva formada pela relação entre a escala de banda crítica em Bark e a frequência em kHz

A escala oriunda da união destes pontos é chamada de taxa de banda crítica, que vai de 0 a 24 e possui a unidade “Bark”, em memória ao cientista Barkhausen (que introduziu o “phone”, que é a unidade que descreve o nível de “loudness”). A relação entre a taxa de banda crítica e a frequência é importante para o entendimento de várias características do ouvido humano, assim como o mascaramento.

2.1 Curva de ponderação A

Embora não seja um parâmetro psicoacústico a curva de ponderação A é a forma mais comum ainda adotada para a representação de ruídos. A curva de ponderação A é determinada utilizando-se como referência um tom padrão de 1 kHz com nível de pressão sonora de 40 dB. A partir deste ponto a frequência é variada e são determinados os pontos

com igual sonoridade, ou seja, são os níveis de pressão sonora necessários para outras frequências discretas para que se tenha a mesma sensação de 40 dB em 1 kHz [4]. Da mesma forma, podem ser obtidas curvas de ponderação B e C, que diferem entre si apenas pelo nível de referência.

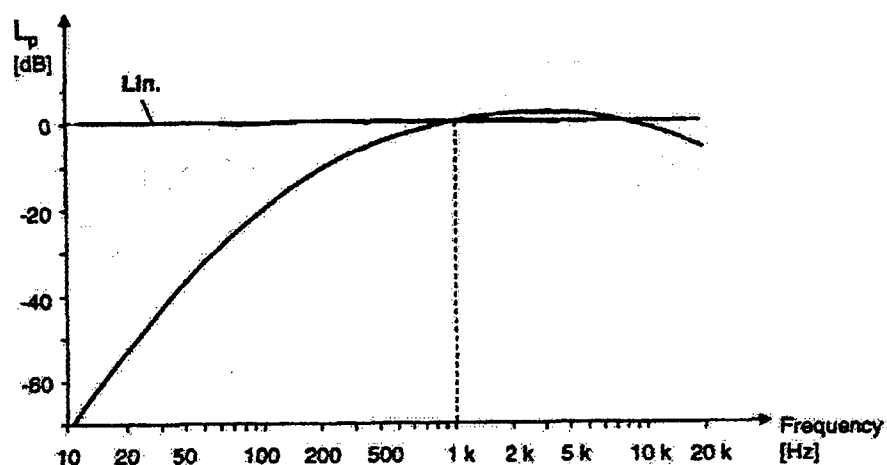


Figura 2.3 – Curva de ponderação A. [4]

A curva de ponderação A é utilizada pois representa a resposta do sistema auditivo ao som, que não é linear para toda a faixa de frequência, e ao ser aplicada sobre um sinal medido irá amplificar os níveis medidos nas frequências entre 1 kHz e 5 kHz, e atenuar nas demais, simulando assim, a forma com que o sistema auditivo percebe o sinal.

2.2 Mascaramento

Um dos fatores da psicoacústica que se encontra presente no dia a dia sem que seja percebido é o mascaramento. Sua definição pode ser concluída facilmente partindo-se da simples observação de uma peça musical.

As peças musicais que utilizam diversos instrumentos, no momento em que um instrumento inicia a sua parte sobrepondo-se à melodia executada por outro, ele poderá estar mascarando o primeiro. Assim, define-se o mascaramento como a sobreposição de

um sinal sobre o outro, tendo como consequência o encobrimento, total ou parcial, da percepção subjetiva do primeiro.

O ouvido humano também apresenta naturalmente o efeito de mascaramento, pois muitos ruídos são mascarados em função de que a membrana basilar no ouvido interno, ao ser excitada por um ruído, não responde em apenas um ponto localizado, mas sim numa área, afetando a percepção de ruídos que se encontrem nesta faixa de percepção.

Para quantificar este efeito deve-se determinar o limiar do mascaramento, sendo, para isto, utilizado um tom puro, chamado de tom de teste, e determinando-se o nível de pressão sonora necessário para que ele se torne audível quando comparado com um sinal mascarador.

O mascaramento pode ocorrer ainda na forma de um sinal mascarador impulsivo, que é emitido antes do início do som a ser mascarado, ou como um sinal mascarador que é desligado durante a emissão do sinal a ser mascarado, gerando uma sensação de redução do mesmo. Estes efeitos são denominados respectivamente de pré e pós-mascaramento.

A acústica utiliza em seus estudos ruídos com características conhecidas para determinação de valores padrão, como o ruído branco, que possui uma densidade espectral constante com a frequência, e o ruído rosa, que apresenta densidade espectral inversamente proporcional à frequência. Estes ruídos são também utilizados para a determinação das características de mascaramento.

A Figura 2.4 representa, nas linhas contínuas, os limites de mascaramento de um tom de teste mascarado por um ruído branco em vários níveis de densidade (I_{wn}), que é o valor da intensidade sonora numa banda de 1 Hz, e a linha descontínua representa o limiar da audição.

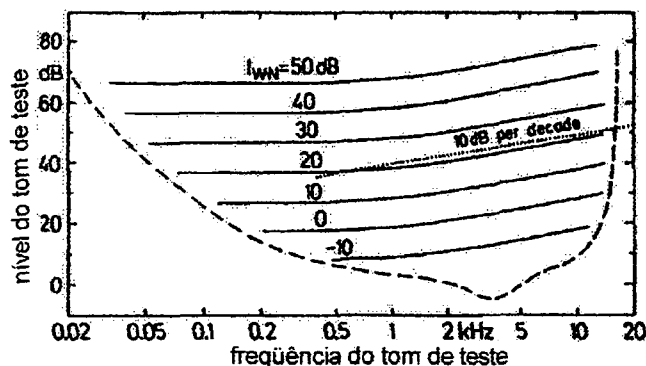


Figura 2.4 – Nível de um tom de teste mascarado por um ruído branco para um dado nível de densidade l_{WN} , em função da frequência do tom de teste. A curva pontilhada indica o limiar da audição. [6]

Embora o ruído branco possua uma densidade espectral independente da frequência percebe-se que acima das frequências em torno de 500 Hz as curvas de mascaramento crescem em função do incremento da frequência, numa taxa de 10 dB por década. Percebe-se também que para os extremos de frequência as curvas de mascaramento acabam se confundindo com a curva do limiar de audição.

A definição de banda estreita aqui aplicada supõe ruídos com largura de banda iguais ou menores do que as larguras de banda crítica, ou seja, com cerca de 100 Hz abaixo de 500 Hz e de $(0,2 \cdot \text{frequência central})$ para frequências acima de 500 Hz.

A Figura 2.5 mostra os limites de tons puros mascarados por ruídos com larguras de bandas críticas com frequências centrais de 0,25 kHz, 1 kHz e 4 kHz. O nível de cada ruído de mascaramento é 60 dB com larguras de bandas de 100 Hz, 160 Hz e 700 Hz, respectivamente.

A relação da frequência do limite de mascaramento com o ruído de banda estreita em 1 kHz é muito similar ao de 4 kHz, porém esta relação comparada ao ruído de banda estreita de 250 Hz, mostra que este possui uma faixa mais ampla. Percebe-se também que o valor máximo do limite de mascaramento possui uma tendência de se reduzir à medida que

ocorre o aumento das frequências centrais de mascaramento, embora o nível da banda estreita de mascaramento seja 60 dB em todas as frequências centrais. A diferença entre o limite máximo de mascaramento e a linha horizontal, que indica o nível do tom de teste de 60 dB, é de 2 dB para 250 Hz, 3 dB para 1 kHz e 5 dB para 4kHz de frequência central.

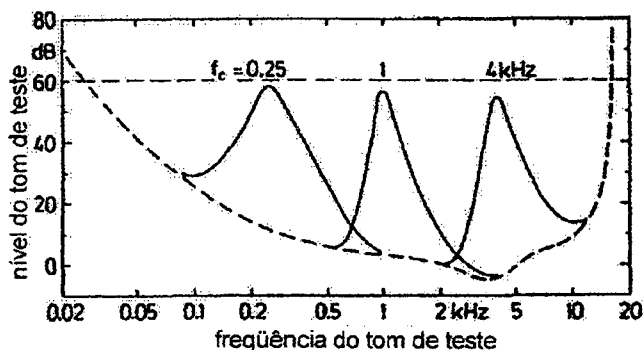


Figura 2.5 – Nível do tom de teste mascarado por um ruído de banda crítica com nível de 60 dB e frequências centrais de 0,25 kHz, 1 kHz e 4 kHz. [6]

A Figura 2.6 mostra a relação do limite de mascaramento do nível de um ruído centrado em 1 kHz. Percebe-se que todos os limites de mascaramento mostram uma ascendência muito rápida das baixas para as altas frequências antes do mascaramento máximo ser alcançado. A curva deste aumento é independente do nível do ruído mascarador, e o máximo sempre se encontra 3 dB abaixo do nível do ruído de mascaramento.

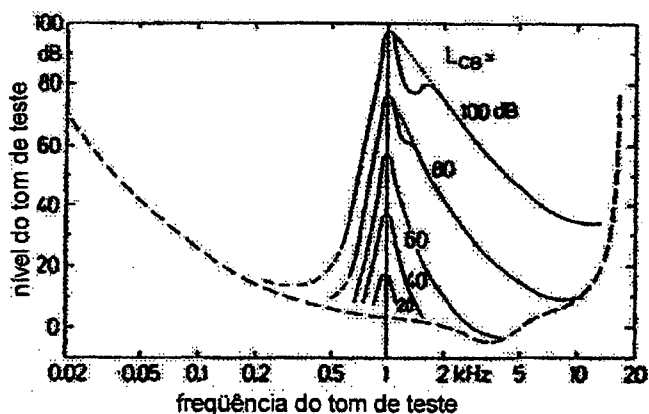


Figura 2.6 – Nível do tom de teste mascarado por um ruído de banda crítica com frequência central de 1 kHz em diferentes níveis em relação a frequência do tom de teste. [6]

A frequência do limite mascarado é dependente do nível, ou seja, afastando-se do valor máximo, o limite de mascaramento se reduz rapidamente para baixos valores, para baixos e médios níveis mascaradores. Entretanto, para altos níveis mascaradores, a curva em direção às altas frequências torna-se cada vez menos acentuada. Os declives indicados na Figura 2.6 para níveis mascaradores de 80 a 100 dB se devem aos efeitos não lineares no sistema auditivo, que cria a diferença de audibilidade de ruídos criados pela interação entre o tom de teste e o ruído de banda estreita.

2.2.1 EFEITOS TEMPORAIS

Os efeitos temporais estão relacionados com a transmissão da informação na música ou fala, pois sons altos são seguidos por sons fracos, e vice versa. Na fala, por exemplo, as vogais geralmente representam as partes mais fortes, enquanto as consoantes são relativamente fracas. Este efeito não ocorre somente em função da reverberação da sala em que se está percebendo o ruído, mas também em condições de campo livre, pois os efeitos temporais do mascaramento são características do sistema auditivo.

Para determinar estes efeitos quantitativamente, mascaradores de duração limitada são utilizados e os efeitos de mascaramento testados com pequenos pulsos. Na Figura 2.7 um mascarador de 200 ms mascara um curto tom pontual (burst tone) com uma duração que é a menor possível e insignificante em relação a duração do mascarador.

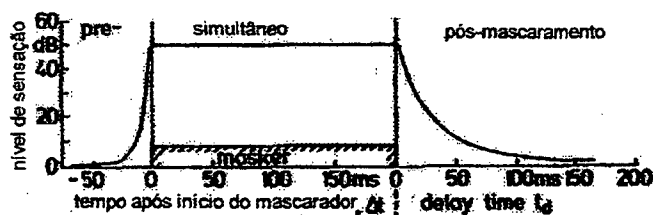


Figura 2.7 – Desenho esquemático caracterizando as regiões de pré-mascaramento, pós-mascaramento e mascaramento simultâneo, onde o pós-mascaramento utiliza uma origem diferente dos demais. [6]

Neste caso, é vantajoso utilizar duas escalas de tempo diferentes. Na primeira, o valor Δt correspondente ao tempo relativo em que o mascarador esteve atuando, existindo aqui valores positivos e negativos. A segunda escala de tempo se inicia no final do mascarador. Este tempo é normalmente denominado tempo de atraso (delay time), e é representado por t_d .

Três diferentes regiões temporais de mascaramento relativas à presença do estímulo do mascarador podem ser diferenciadas. O pré-mascaramento tem lugar durante o período de tempo anterior ao início do mascarador, onde valores negativos de Δt são aplicáveis. A segunda é o mascaramento simultâneo, que é a região onde o mascarador e o som de teste estão presentes simultaneamente, sendo Δt nesta condição positivo. E o pós-mascaramento ocorre após o fim do mascarador e, embora a escala de tempo é positiva dada pelo tempo de atraso (t_d) permaneça, o mascarador não existe mais fisicamente, mas o seu efeito de mascaramento permanece.

O efeito do pré-mascaramento é compreensível quando cada sensação é encarada não ocorrendo instantaneamente, mas requerendo um tempo de crescimento para ser percebido. Assumindo-se um tempo rápido de crescimento para mascaradores intensos e um tempo de crescimento baixo para sons de testes com pequena intensidade pode-se entender a ocorrência do pré-mascaramento .

A região temporal na qual o pré-mascaramento ocorre é mostrada na Figura 2.7, sendo ele medido principalmente com mascaradores com tons pontuais (bursts tones), obtendo-se resultados com boa repetitividade apenas com avaliadores treinados. Mesmo com estes avaliadores, a reprodutibilidade dos resultados é pior do que para o mascaramento simultâneo ou o pós-mascaramento.

Não tem sido possível afirmar conclusivamente até que ponto o pré-mascaramento depende da duração do mascarador. A sua relação com o nível do mascarador pode ser caracterizada de forma que o pré-mascaramento finaliza-se após 20 ms em qualquer condição.

Isto significa que o limite permanece inalterado até que Δt alcance um valor negativo de 20 ms. Após este valor, o limite se altera e alcança o nível encontrado no mascaramento simultâneo próximo ao tempo onde o mascarador é acionado. O pré-mascaramento sozinho determina uma regra relativamente secundária, já que seu efeito acaba após 20 ms e depois disto é usualmente ignorado.

O pós-mascaramento depende da duração do mascarador, a Figura 2.8 mostra um resultado típico de medição utilizando como som de teste um tom pontual de 2 kHz com 5 ms de duração, sendo que o tempo em que o tom de teste pontual está presente após o fim do mascarador é apresentado na abcissa e o nível do tom de teste pontual na ordenada.

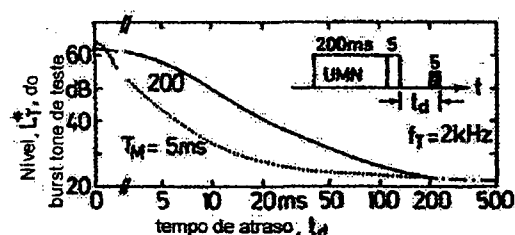


Figura 2.8 – O pós-mascaramento depende do tempo de duração do mascarador: níveis de tons de teste pontuais just-audível são indicados em função dos seus tempos de atraso após o desligamento dos mascaradores com 200 ms e 5 ms de duração. O nível do ruído de mascaramento uniforme é 60 dB; a duração do tom de teste de 2 kHz é de 5 ms. O tempo de atraso é o tempo entre o final do mascarador e o final do tom de teste. [6]

Diferentemente o pós-mascaramento produzido por um mascarador com tom pontual, termina após apenas 5 ms, como indicado pela linha pontilhada na Figura 2.8. Neste caso, o decaimento é inicialmente muito íngreme. Isto significa que o pós-

mascamamento depende fortemente da duração do mascarador e possui um efeito não linear.

2.3 Loudness

O termo "*loudness*" pode ser traduzido como sonoridade, ou seja, quando trata-se de determinar o "*loudness*" de um som ou ruído está se falando em determinar o quão sonoro o mesmo é.

Comparações de valores de "*loudness*" podem resultar em resultados mais precisos do que as estimativas da magnitude de um som. Por esta razão, a medida de nível de "*loudness*" foi criada para caracterizar a sensação de qualquer som, sendo introduzida nos anos vinte por Barkhausen. [10]

O nível de "*loudness*" de um som é o nível de pressão sonora de um tom de 1 kHz de uma onda plana com incidência normal ao ouvido que seja tão sonoro quanto o som que está sendo avaliado, e sua unidade é o "phon".

Linhas ligadas por pontos de mesmo "*loudness*" na região de audição são geralmente chamadas de linhas de igual-sonoridade (*equal-loudness*). Linhas de igual-sonoridade para tons puros são mostrados na Figura 2.9, e em função da sua definição, todas as curvas devem possuir valores tendendo ao nível de pressão sonora em 1 kHz. Devem possuir o mesmo valor, em dB, do parâmetro da curva em phons, ou seja, a linha de igual-sonoridade para 40 phons deve tender para um valor de 40 dB em 1 kHz. O limiar da audição, onde o limite de sensação do "*loudness*" é alcançado, é também um contorno de igual-sonoridade, e em função do limite no silêncio corresponder a 3 dB em 1 kHz e não a 0 dB, este contorno de igual-sonoridade é indicado por 3 phons, já que a correspondência de 0 dB com 0 sone é alcançada apenas na frequência de 2 kHz.

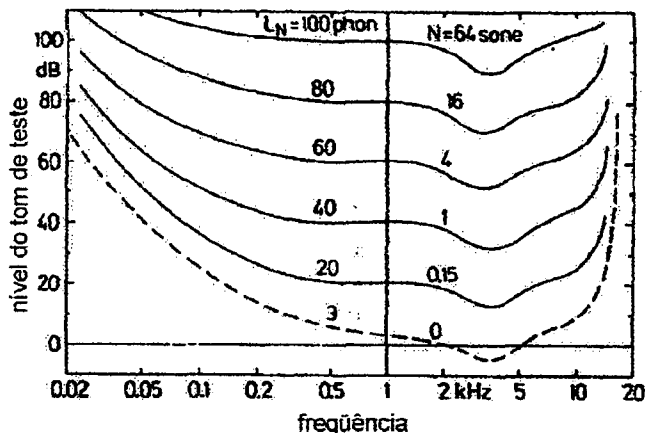


Figura 2.9 – Linhas de igual-sonoridade para tons puros em campo livre. Os parâmetros são expressos em nível de “loudness”, L_N , e “loudness”, N . [6]

Os contornos de igual-sonoridade são normalmente obtidos para ondas planas de incidência normal. Porém, em muitos casos, o campo sonoro pode ser difuso, no qual o som incide em todas as direções. O nosso sistema auditivo não é igualmente sensível ao som vindo de diferentes direções e a dependência da direção está relacionada também com a frequência. Por esta razão, os contornos de igual-sonoridade para campos sonoros normais e para campos sonoros difusos são diferentes.

Esta diferença pode ser mais facilmente expressa pela atenuação, a_D , que é necessária para produzir o mesmo “loudness” no campo normal e no campo difuso, sendo que Figura 2.10 mostra a relação desta atenuação a_D na frequência. Percebe-se que nas baixas frequências, esta atenuação é desprezível, pois o nosso sistema auditivo atua como um receptor omnidirecional.

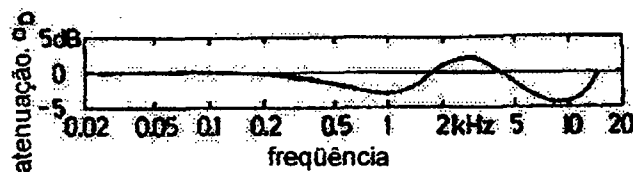


Figura 2.10 – Atenuação, a_D , necessária para produzir o mesmo igual-sonoridade para um tom puro em campo difuso e em campo livre em função da frequência do tom puro. [6]

A atenuação ocorre da seguinte forma. Por exemplo, em 1 kHz, a atenuação é de -3 dB, ou seja, o nível de pressão sonora de um tom de 1 kHz num campo difuso deve ser 3 dB menor do que o nível de pressão sonora de um tom de 1 kHz em um campo normal, para produzir o mesmo “*loudness*”. Em relação às altas frequências, a atenuação, a_D , incrementa até alcançar o limite de 2 dB a 2,5 kHz. Porém para todas as outras altas frequências a_D decresce.

As medições que levaram aos resultados de a_D foram realizados utilizando não tons senoidais, mas com ruídos de banda estreita, assim, a frequência apresentada como abcissa na Figura 2.10 deve ser encarada como a frequência central do ruído de banda estreita. Utilizando os dados apresentados na Figura 2.10 juntamente com os apresentados na Figura 2.9, as linhas de igual-sonoridade para o campo difuso podem ser facilmente construídas.

Como referência para a sensação de “*loudness*”, isto é, o valor que corresponde a 1 sone, foi adotado o valor de um tom com um nível de 40 dB a 1 kHz. Para avaliações de “*loudness*”, se duplica ou se reduz a metade o valor do estímulo. Assim, o avaliador procura por um nível de incremento que forneça uma sensação que seja duas vezes mais alta ou menor do que a do ruído inicial. As médias de várias medições deste tipo indicaram que o nível de um tom de 1 kHz num campo normal deve ser aumentado de 10 dB para aumentar a sensação de “*loudness*” num fator de dois. Por exemplo, o nível de pressão sonora de 40 dB deve ser aumentado para 50 dB para que se dobre o valor do “*loudness*”, o que corresponderá então a 2 sones.

Para que se apresente graficamente funções do “*loudness*” em toda a faixa de níveis, experimentos dobrando e reduzindo à metade o “*loudness*” em diferentes níveis

devem ser realizados. Os dados mostrados na Figura 2.11 representam o nível de incremento necessário para produzir a sensação que possa ser descrita como duas vezes mais alta do que a do nível inicial. Um decremento na mesma forma irá resultar num “loudness” com valor reduzido à metade, sendo que os resultados mostram que estes níveis de incremento ou decremento são praticamente independentes do nível de 1 kHz para valores maiores que 40 dB.

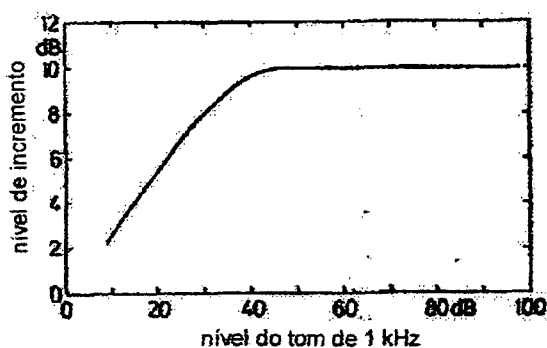


Figura 2.11 – Nível de incremento (ou decremento) necessário para produzir o dobro (ou a metade) do “loudness” de um tom de 1 kHz em função do seu nível. [6]

2.3.1 DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE “LOUDNESS”

As curvas de igual-sonoridade vistas até agora, tanto para tons puros quanto para ruídos de banda, apresentam somente interesse acadêmico. Fletcher e Munson propuseram um procedimento para o cálculo a partir de medidas físicas de sons complexos formados por um determinado número de tons. O seu método, entretanto, não é utilizado em função da sua complexidade e pelo fato de a grande maioria dos sons de interesse prático tenderem a espectros de banda larga e não de tons puros.

Gates e depois Beranek [10] propuseram que uma simples soma do “loudness” em sonos em bandas de oitava deveria fornecer, com uma aproximação razoável, o “loudness” percebido por sons complexos compostos por mais de uma oitava de um ruído aleatório.

Foi assumido, nestas propostas, que um ruído aleatório em bandas de oitava tendo o mesmo nível global de nível de pressão sonora que o de um tom puro com mesma frequência central, possuiriam mesmo “loudness”.

Porém, estes métodos não se mostraram operacionais ou com valores não totalmente confiáveis. Assim, para a determinação de valores de “loudness” e nível de “loudness” atualmente se utilizam dois métodos principais: o Método de Stevens e o Método de Zwicker, sendo o primeiro utilizado normalmente para bandas de oitava e o segundo para bandas de terço de oitava.

Ambos os métodos são normalizados e os procedimentos de determinação encontram-se na norma ISO 532.

Método de Stevens

Em complemento às curvas de igual-sonoridade já existentes para a determinação do “loudness” de ruídos aleatórios em bandas de oitava, Stevens publicou novos procedimentos para a determinação do “loudness” total de espectros contínuos de sons.

[13]

Stevens demonstrou que o seu método era mais preciso na predição e julgamento do “loudness” de sons complexos compostos de ruídos aleatórios do que o método de simples adição dos valores de sone das bandas individuais.

A fórmula geral de Stevens é dada pela soma do valor em sone da banda com maior “loudness” com uma fração proporcional da soma do valor em sone das bandas restantes:

$$\text{“loudness”} = s_m + f \cdot \left(\sum s - s_m \right)$$

sendo:

s_m , o maior valor, em sone, apresentado pelas bandas de frequência,

f , a fração proporcional que depende da largura de banda,

s , o valor, em sones, das bandas restantes .

Stevens determinou frações para bandas de oitava ($f = 0,3$), meia-oitava ($f = 0,2$) e terço de oitava ($f = 0,15$).

Stevens modificou ligeiramente este seu método de cálculo e o chamou de Método Mark IV, sendo este adotado pela ISO como o procedimento a ser utilizado para o cálculo do “*loudness*” em ruídos de oitava. Os procedimentos e a fórmula para o cálculo do “*loudness*” neste novo método, o Mark IV, é idêntico ao método anterior, sendo os valores individuais de cada banda encontrados em um gráfico que indica as linhas “*loudness*” index, que substituem os valores em sones. Estas curvas são semelhantes às curvas de igual-sonoridade.

Para a determinação do nível de “*loudness*”, aplica-se o valor de S_i na fórmula:

$$P = 40 + 10 \cdot \log_2 S_i$$

sendo esta relação representada no lado direito da Figura 2.12.

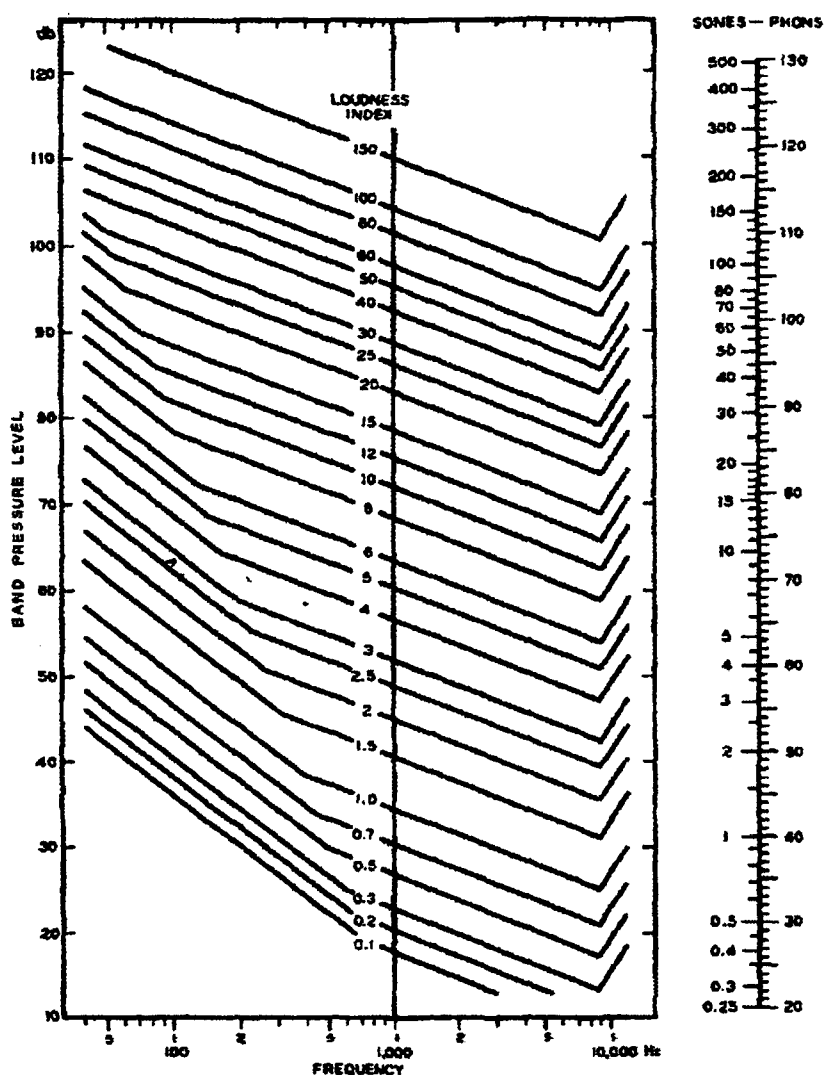


Figura 2.12 – Gráfico para determinação dos valores de “loudness” index para cálculo do “loudness” pelo método de Stevens. [11]

Método de Zwicker

Fletcher e Munson sugeriam que o “loudness” é proporcional ao número de impulsos nervosos que chegam por segundo ao cérebro pelos nervos auditivos. Porém, eles perceberam que quando dois tons eram impostos a um mesmo nervo acontecia a soma do “loudness” dos tons, sendo que isto ocorria para todo um grupo de tons numa certa banda de frequência.

A largura deste grupo de frequências foi levantado por Fletcher e Munson, porém os valores determinados por Zwicker, através de testes subjetivos de mascaramento e “loudness” revelou valores mais exatos, que são os valores das larguras de bandas críticas.

Baseado nestes conceito, Zwicker desenvolveu um método gráfico para ilustrar e determinar o “loudness” de sons complexos, preparando para isto, um conjunto de dez gráficos, que cobrem todas as condições de campo livre e campo difuso, que estão divididas em faixas de frequência de banda crítica.

A norma ISO 532 considera como definição de banda crítica como sendo aproximadamente iguais as bandas de terço de oitava para frequências acima de 280 Hz e, para frequências menores, como igual aos grupos de bandas de terço de oitava.

Para a aplicação do método, o campo sonoro deve ser observado. O campo difuso, que considera que o ouvido do ouvinte recebe as ondas sonoras de todas as direções e com mesma intensidade, e o campo de som frontal, que considera que o som chega até o ouvinte, a partir de um ponto localizado diretamente à frente do mesmo, em linha reta, no ar livre ou num ambiente sem reflexões.

O procedimento de cálculo é dividido em três passos, baseados no conjunto de gráficos desenvolvidos por Zwicker, dos quais cinco utilizados para campo de som frontal e cinco para campo difuso.

O primeiro passo consiste na seleção do gráfico em função do tipo de campo e do valor máximo do nível de banda de terço de oitava medido, e da marcação dos valores de nível de pressão sonora em cada gráfico, sendo que cada um contém curvas na forma de degraus que relacionam os valores dos níveis da cada banda de terço de oitava (L_T).

Os níveis medidos devem ser marcados nos gráficos para as frequências de banda acima de 280 Hz na forma de linhas horizontais, sendo que as frequências de corte de cada

banda de terço de oitava correspondem às abcissas e os valores indicados nos degraus, os níveis.

Como nas baixas frequências as bandas críticas são mais largas do que as bandas de terço de oitava é feito o agrupamento das bandas de baixas frequências da seguinte forma: para frequências com frequência de corte até 90 Hz, tem-se uma banda crítica L_1 ; para as três bandas seguintes entre 90 Hz e 180 Hz tem-se L_2 e para as duas bandas entre 180 Hz e 280 Hz tem-se L_3 .

A forma para combinação das frequências é a apresentada no exemplo seguinte:

$$L_2 = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{anti log } L_{100}}{10} + \frac{\text{anti log } L_{125}}{10} + \frac{\text{anti log } L_{160}}{10} \right)$$

onde L_{100} é o nível de pressão sonora medido na banda de terço de oitava de frequência central 100 Hz, L_{125} para 125 Hz e L_{160} para 160 Hz.

O segundo passo indica a conexão dos pontos marcados. Se os degraus formados pelas linhas horizontais estiverem crescendo juntamente com a frequência, as linhas horizontais adjacentes deverão ser ligadas por linhas verticais entre suas abcissas comum. Quando o nível na próxima frequência superior é menor, a curva para baixo é desenhada com uma inclinação descendente interpolada entre as linhas tracejadas do gráfico, iniciando do fim da linha horizontal da direita.

O terceiro passo indica que esta área determinada deve ser transformada num retângulo de mesma área, tendo uma base com valor igual ao comprimento do gráfico, assim a altura do retângulo irá indicar o nível de "loudness", em phons, ou o "loudness", em sones, a partir das escalas adjacentes ao gráfico.

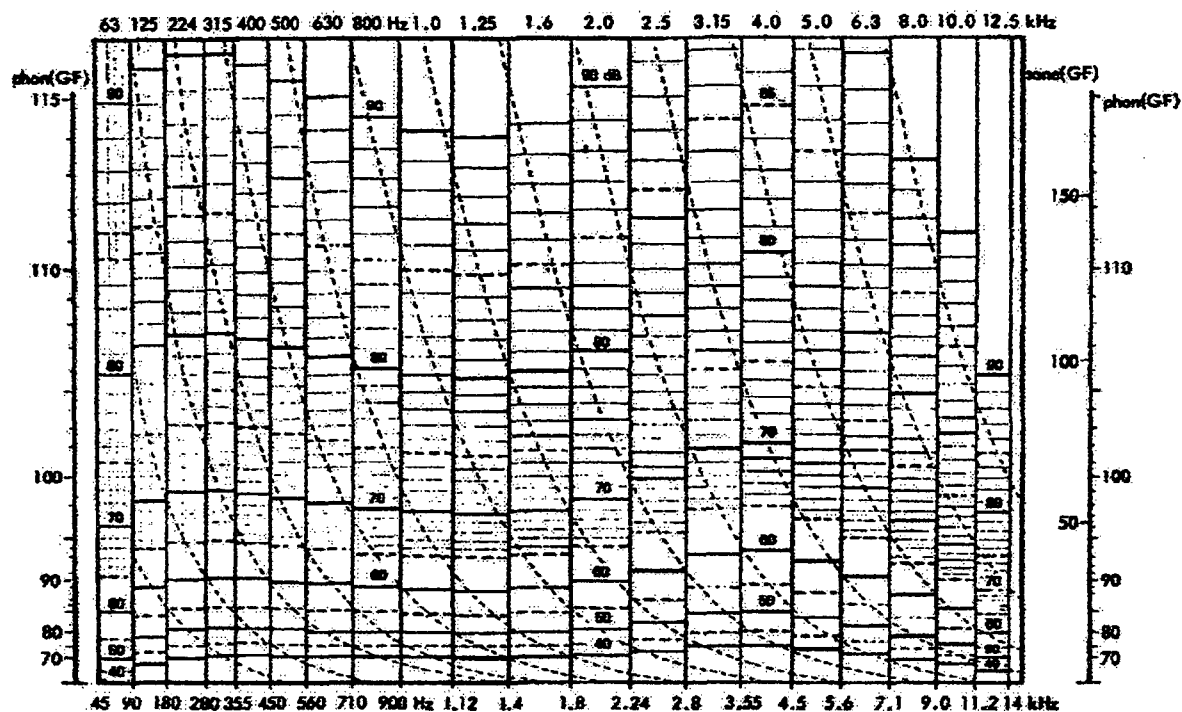


Figura 2.13 – Exemplo de gráfico utilizado para determinação do “loudness” pelo método de Zwicker. [11]

2.4 Sharpness

O “sharpness” é uma sensação que pode ser considerada separadamente das demais, ou seja, pode-se comparar o “sharpness” de um ruído diretamente com o “sharpness” de outro, sendo que o principal fator que irá diferenciar os seus valores é a variação do seu envelope espectral.

Ruídos com espectros contínuos podem apresentar o mesmo valor de “sharpness” de ruídos que apresentem espectros com muitas variações, desde que os seus envelopes espectrais, quando medidos considerando bandas críticas, apresentem o mesmo valor.

O “sharpness” incrementa para um nível de incremento de 30 dB para 90 dB por um fator de dois, o que significa que a dependência com o nível pode ser ignorada como primeira aproximação, especialmente se a diferença entre níveis não for muito grande. Outro pequeno efeito é a relação com a largura de banda tanto com bandas pequenas

quanto com a escala de banda crítica, já que nenhuma diferença no “*sharpness*” pode ser determinada se um tom ou cinco tons são utilizados para gerar uma banda crítica ou quando é utilizado um ruído com banda crítica para a comparação.

Assim, os parâmetros de maior importância na influência do “*sharpness*” são o conteúdo espectral e a frequência central de sons de banda estreita. De maneira a fornecer valores quantitativos, um ponto de referência e uma unidade foram definidas, partindo-se da expressão em latin, “*acum*”, que é utilizada para agudo, o som de referência produzindo 1 acum foi definido como um ruído de banda estreita com largura de banda crítica com frequência central de 1 kHz e com um nível de 60 dB. Este ponto de referência está marcado na Figura 2.14 por uma cruz.

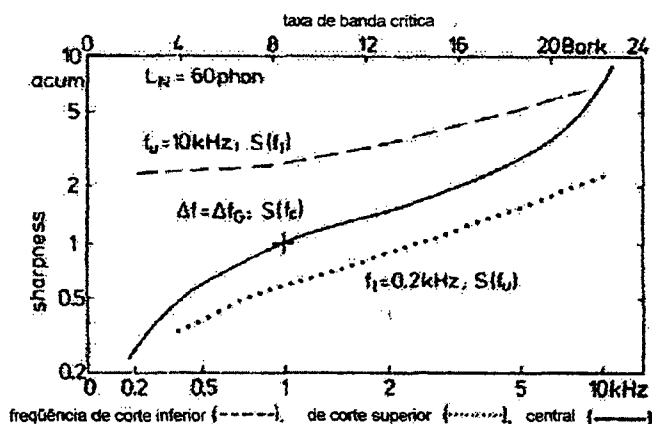


Figura 2.14 – “*sharpness*” de ruídos de banda larga, estreita e com largura de banda crítica em função da frequência central (linha sólida), de ruídos passa banda com frequência de corte superior de 10 kHz em função da frequência de corte inferior (tracejada) e um ruído passa banda com frequência de corte inferior de 0.2 kHz em função da frequência de corte superior (pontilhada). O nível de “*loudness*” dos ruídos é de 60 phon. [6]

A linha sólida nesta figura indica o “*sharpness*” de ruídos de banda larga com largura de banda crítica em função das suas frequências centrais mostradas na abcissa. Deve-se notar que a abcissa possui uma escala não-linear que corresponde à taxa de banda crítica dada como uma escala linear na abcissa superior. O valor do “*sharpness*”,

representado na ordenada, é dado em escala logarítmica. A curva sólida pode ser considerada como uma relação do estímulo versus a função de sensação para o “*sharpness*”.

Para ruídos de banda estreita, o “*sharpness*” incrementa com o incremento da frequência central, sendo que para baixas frequências centrais, o “*sharpness*” incrementa quase na proporção da taxa de banda crítica. Isto pode ser observado em função do ponto de referência, que pertence a uma taxa de banda crítica de 8,5 Bark, correspondendo a um “*sharpness*” de 1 acum, que é aproximadamente quatro vezes maior do que aquele produzido por um ruído de banda estreita centrado numa frequência de 200 Hz, que vale 2 Bark, indicando 0,25 acum.

Para uma taxa de banda crítica de 16 Bark que corresponde a uma frequência central de 3 kHz, o “*sharpness*” é elevado cerca de duas vezes mais do que o de uma frequência central de 1 kHz. Isto significa que a proporcionalidade do “*sharpness*” e da taxa de banda crítica ocorre até próximo de 3 kHz, para frequências maiores, entretanto, onde a taxa de banda crítica não incrementa muito mais em função do seu limite de 24 Bark, o “*sharpness*” incrementa mais rapidamente do que a taxa de banda crítica da frequência central do ruído de banda estreita.

Este efeito é claro considerando o fato de que sons com domínio de frequências muito altas produzem uma sensação que é caracterizada pelo alto valor do seu “*sharpness*”. Para frequências muito baixas próximas de 200 Hz até altas frequências em torno de 10 kHz, o “*sharpness*” possui um incremento num fator de 50.

2.5 Fluctuation strength

Sons modulados fornecem dois tipos diferentes de sensações auditivas: para baixas frequências de modulação, até 16 Hz, a sensação auditiva do “*fluctuation strength*” é

percebida, a partir da qual, para altas frequências de modulação, a sensação de audição do “*roughness*” é percebida. Para frequências de modulação em torno de 20 Hz, há uma transição entre a sensação de audição do “*fluctuation strength*” e do “*roughness*”, que por ser uma transição suave apresenta uma grande região de indefinição entre as duas sensações.

A Figura 2.15 mostra a relação do “*fluctuation strength*” com a frequência de modulação, onde os gráficos representam os dados para o ruído de banda larga com amplitude modulada (AM BBN), tom puro com amplitude modulada (AM SIN) e tom puro com frequência modulada (FM SIN). Em cada gráfico, o “*fluctuation strength*” é normalizado ao máximo valor do som (ordenada do lado esquerdo).

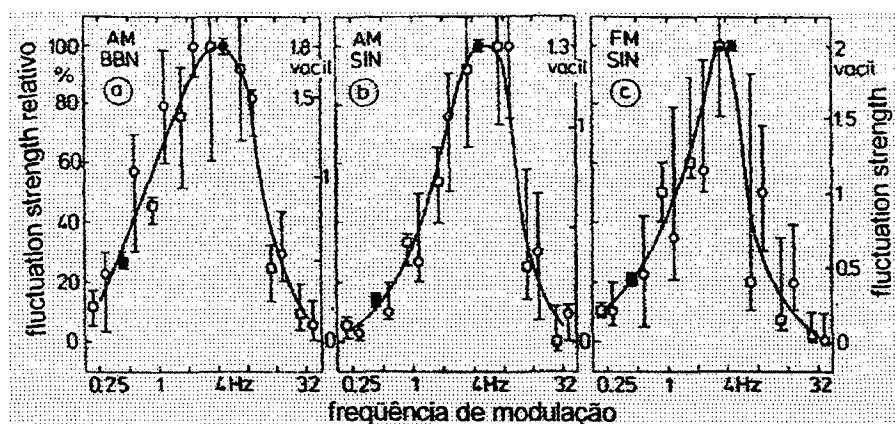


Figura 2.15 – “*fluctuation strength*” de três ruídos modulados em função da modulação em frequência. Painel (a): ruído de banda larga com amplitude modulada com 60 dB de nível de pressão sonora e 40 dB de intensidade de modulação; (b): tom de 1kHz com amplitude modulada com 70 dB de nível de pressão sonora e 40 dB de intensidade de modulação; (c): tom puro com frequência modulada com 70 dB de nível de pressão sonora, frequência central de 1500 Hz e ± 700 Hz de desvio de frequência. [6]

Como o “*fluctuation strength*” é uma sensação que pode ser considerada separadamente das outras sensações, assim como o “*sharpness*”, ambos os valores, relativos e absolutos, são úteis. Um ponto fixo foi definido para um tom de 60 dB e 1 kHz com 100% de amplitude modulada em 4 Hz, produzindo 1 vacil (do vacilare em latim).

Todos os três gráficos da Figura 2.15 mostram claramente que o “*fluctuation strength*” apresenta uma característica tipo passa banda em função da modulação da frequência, com um valor máximo em torno de 4 Hz. Isto significa que os sons com frequência modulada em 4 Hz apresentam grande “*fluctuation strength*”, utilizando tanto amplitude quanto frequência modulada, ou tanto sons de banda larga ou banda estreita.

O máximo valor de “*fluctuation strength*” para uma frequência de modulação em torno de 4 Hz encontra a sua justificativa na variação do envelope temporal da fala fluente, pois a taxa da fala normal, de 4 sílabas/segundo, é usualmente produzida levando a uma variação do envelope temporal numa frequência de 4 Hz. Isto justifica os valores máximos encontrados e o porque da excelente correlação entre a fala e o sistema auditivo.

2.6 Roughness

Utilizando um tom de 1 kHz com amplitude 100 % modulada e variando o valor da frequência de baixas para altas frequências, três áreas diferentes de sensação podem ser identificadas. Uma primeira região é a do “*fluctuation strength*”, que alcança um valor máximo em frequências de modulação próximas de 4 Hz e decresce até em torno de 16 Hz, onde a sensação do “*roughness*” começa a se tornar perceptível, alcançando o seu valor máximo em frequências de modulação próximas a 70 Hz e decrescendo para valores maiores de frequência de modulação.

O “*roughness*” é criado por uma mudança relativamente rápida produzida pela frequência de modulação na região compreendida entre 15 Hz e 300 Hz, não havendo necessidade de uma modulação periódica exata, mas apenas que o espectro de modulação esteja entre 15 Hz e 300 Hz. Por esta razão, a maioria dos ruídos de banda estreita com um som dito “áspero” não apresentam uma variação periódica no envelope ou na frequência. O

“*roughness*”, assim como o “*sharpness*” e o “*fluctuation strength*” é também uma sensação que pode ser considerada individualmente, ignorando as demais sensações.

De forma a descrever o “*roughness*” quantitativamente, um valor de referência foi definido. Partindo-se do termo em latim “*asper*”, que caracteriza o que se define de “aspereza sonora”, definiu-se para o “*roughness*” de 1 asper, um tom com 60 dB de intensidade em 1 kHz, modulado 100 % numa frequência de modulação de 70 Hz. Três parâmetros são importantes na determinação do “*roughness*”: a amplitude de modulação, o grau de modulação e a frequência de modulação. Para a frequência de modulação, o índice de modulação e a frequência de modulação são considerados.

A Figura 2.16 mostra o “*roughness*” de um tom de 1 kHz com uma frequência de modulação de 70 Hz, em função do grau de modulação. Os dados, indicados pela linha sólida, podem ser aproximados pela linha tracejada. Em função das ordenadas e abcissas serem representadas em escala logarítmica, a linha reta tracejada representa uma variação exponencial, onde o valor do expoente é próximo de 1,6, donde o “*roughness*” resulta em 0,1 asper, produzido para um grau de modulação de 25 %.

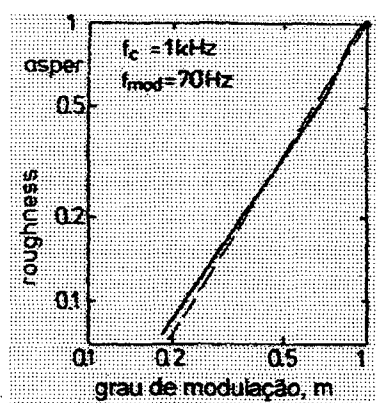


Figura 2.16 – “*roughness*” em relação do grau de modulação para um tom de 1 kHz, com amplitude modulada numa frequência de 70 Hz. A linha tracejada indica uma aproximação linear da relação. [6]

Esta relação do “*roughness*” com o grau de modulação se mantém para tons com outras freqüências centrais também, embora a freqüência de modulação para que o valor máximo do “*roughness*” seja alcançado dependa da freqüência central. A Figura 2.17 mostra a relação do “*roughness*” com a freqüência de modulação para diferentes freqüências centrais com 100% de modulação. Esta relação apresenta uma característica de passa banda. O “*roughness*” incrementa quase linearmente a partir de baixas freqüências de modulação, nas duas coordenadas logarítmicas da Figura 2.17, antes de alcançar o seu valor máximo.

Este valor máximo depende apenas das freqüências portadoras abaixo de 1 kHz onde o valor máximo é alcançado para baixas freqüências de modulação com o decréscimo da freqüência portadora. Para freqüências centrais acima de 1kHz, a amplitude do máximo é reduzida embora a freqüência de modulação em que o valor máximo é alcançado permaneça inalterada. Isto significa que para freqüências centrais acima da freqüência central de 1 kHz existe um decaimento paralelo com o incremento da freqüência central.

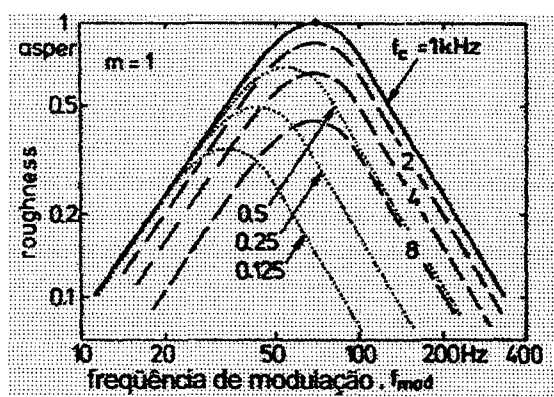


Figura 2.17 – “*roughness*” de tons com amplitude modulada em 100 % das freqüências centrais em relação a freqüência de modulação. [6]

A Figura 2.18 mostra a relação do “*roughness*” relativo com a frequência de modulação para um ruído de banda larga com amplitude modulada, tons puros com amplitude modulada, e tons puros com frequência modulada. Na mesma linha dos dados apresentados na Figura 2.17 os valores máximos do “*roughness*” ocorrem em torno da frequência de modulação de 70 Hz independentemente da largura de banda ou do tipo de modulação. Como para tons puros com amplitude modulada também para ruídos de banda larga com amplitude modulada ou tons puros com frequência modulada o “*roughness*” desaparece para frequências de modulação acima de 300 Hz.

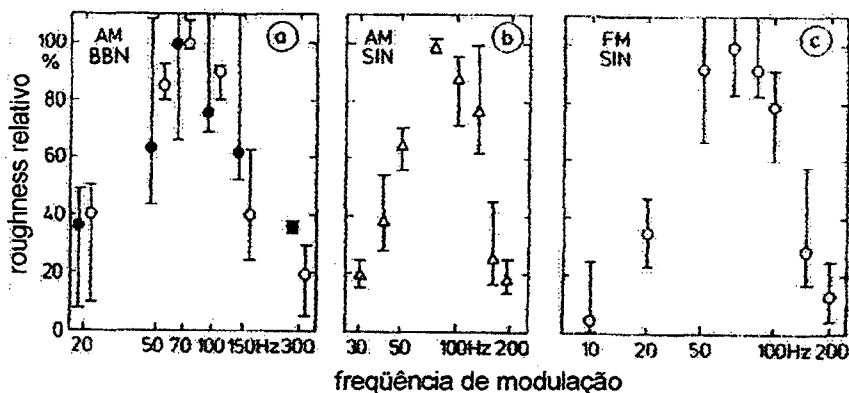


Figura 2.18 – “*roughness*” de três sons modulados em função da frequência de modulação. (a): Ruído de banda larga com amplitude modulada e nível de pressão sonora de 60 dB e intensidade de modulação de 40 dB; (b) Tom de 1 kHz com 70 dB de nível de pressão sonora e 40 dB de intensidade de modulação; (c) tom puro com frequência modulada com 70 dB de nível de pressão sonora, frequência central de 1500 Hz e ± 700 de desvio de frequência. [6]

2.7 Métricas de tom puro

Além das métricas usuais de psicoacústica apresentadas anteriormente existem algumas desenvolvidas de acordo com as necessidades de setores específicos da indústria como as métricas “*proeminence ratio*” e “*tone-to-noise ratio*”.

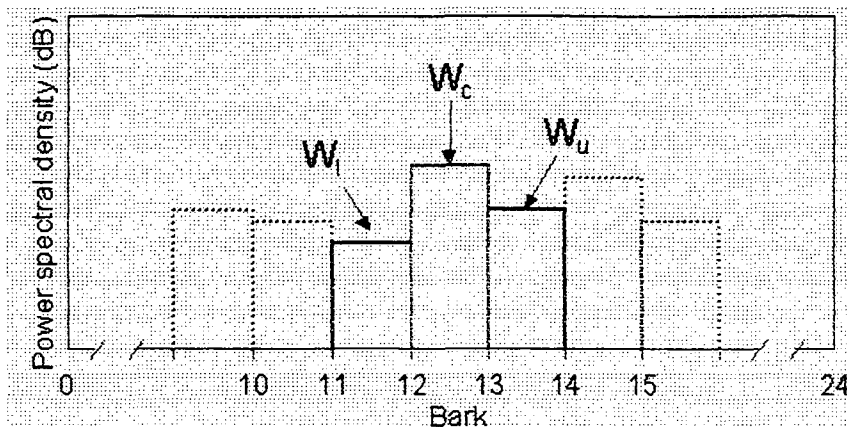


Figura 2.19 - Representação do conceito do “*proeminence ratio*”, sendo W_c a potência da banda crítica em torno do tom puro e W_l e W_u as potências das bandas críticas adjacentes. [3]

Estas métricas foram desenvolvidas para suprir a necessidade da indústria de informática em analisar as componentes de tons puros emitidas por seus equipamentos, sendo o “*tone-to-noise ratio*” a diferença do nível de pressão sonora do tom puro em si e do nível de pressão sonora da banda com largura de banda crítica centrada no tom puro, mas sem considerá-lo. O “*proeminence ratio*” compara a diferença da potência das bandas críticas adjacente à banda crítica centrada no tom puro. Ambas são calculadas segundo a norma ANSI S1.13 – 1995.

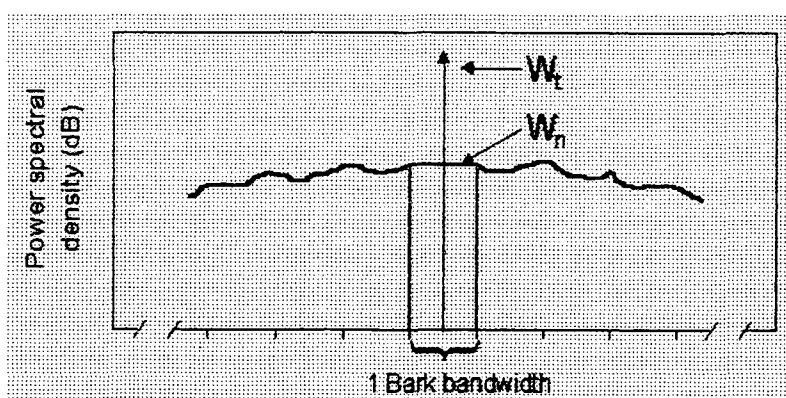


Figura 2.20 - Representação do conceito do “*tone-to-noise ratio*”, sendo W_t o nível de pressão sonora do tom puro em si e W_n o nível de pressão sonora da banda com largura de banda crítica com a ausência do tom puro. [3]

A avaliação destes parâmetros é feita relacionando o quanto “proeminente” é o sinal, sendo que para o “*proeminence ratio*” diferenças acima de 7 dB são consideradas “proeminentes” e para o “*tone-to-noise ratio*” diferenças acima de 6 dB já são consideradas proeminentes, ou seja, nestes casos as componentes de tom puro afetam na avaliação dos jurados.

3 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO SUBJETIVA PELA ANÁLISE DE JÚRI

Para o desenvolvimento dos conceitos de qualidade sonora foram definidas etapas para a composição da estrutura e procedimentos básicos necessários para a aplicação correta e obtenção de dados confiáveis dos resultados obtidos.

A primeira etapa foi o desenvolvimento da estrutura da sala de análise subjetiva, determinando as alterações necessárias para que a sala apresentasse as mesmas características acústicas de uma cozinha. A partir daí foram selecionadas as fontes de ruído, compressores e sistemas de refrigeração, considerando modelos de compressores com capacidades semelhantes e sistemas de refrigeração compatíveis com esta capacidade.

Após a seleção das fontes foram determinadas as formas de gravação, bem como os momentos que deveriam ser considerados, além da determinação das formas de exposição do júri na apresentação direta. Com os sinais gravados e analisados foi realizada a estruturação do júri digital, com a seleção dos sinais, tempos de reprodução e dos intervalos entre os sinais.

Uma das etapas que exigiu maior atenção foi a estruturação do questionário para avaliação das impressões dos jurados, pois este foi o instrumento de ligação entre os jurados e as conclusões para determinação das correlações das métricas.

Com todos os elementos estruturados foi realizada a exposição dos jurados aos ruídos e então a análise das suas respostas, cruzando estas informações com os valores das métricas da psicoacústica e com os valores em dB e dB(A).

Para uma melhor visualização da seqüência adotada para estruturação da metodologia os passos adotados foram ordenados no diagrama mostrado na Figura 3.1.

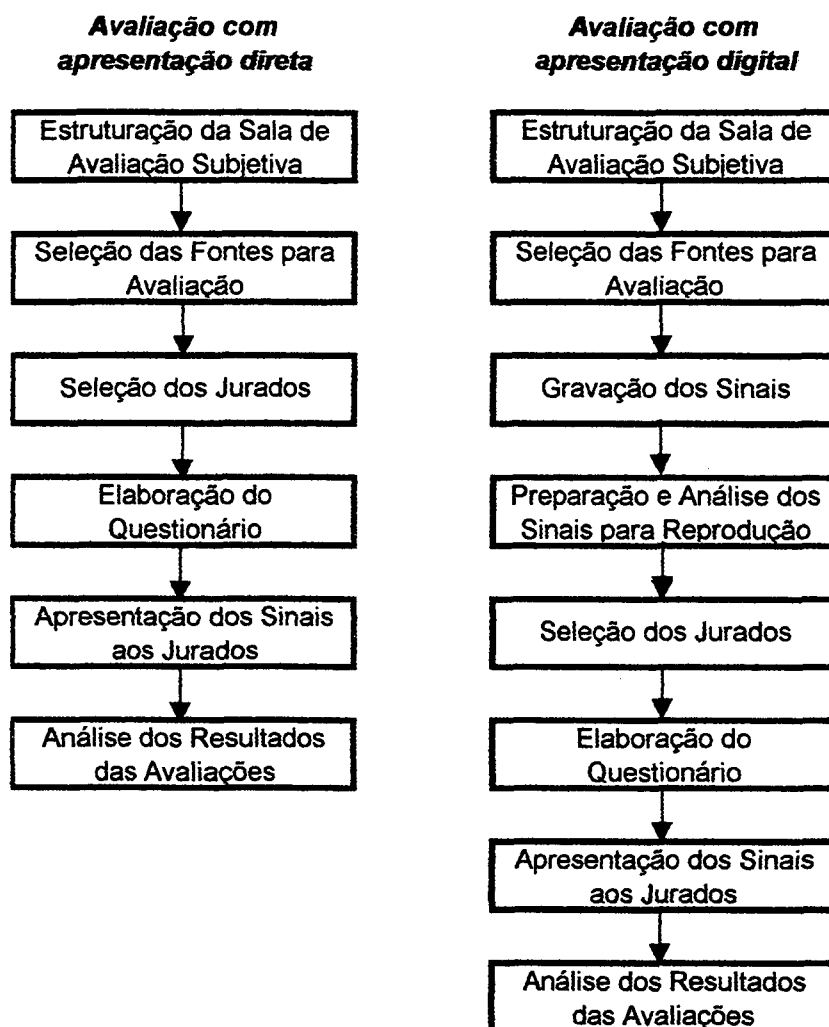


Figura 3.1 – Esquema com a seqüência adotada para o desenvolvimento da metodologia para a análise de júri.

3.1 Ajuste da sala de análise subjetiva

A base para a aplicação do método é a preparação de um ambiente para gravação e reprodução dos sinais que seja o mais semelhante possível ao ambiente real de utilização dos refrigeradores a serem analisados. Neste caso, o ambiente real será uma cozinha, e o ambiente de teste deverá ter as mesmas características acústicas que em uma cozinha típica.

Para a reprodução desta cozinha típica foi utilizada uma sala com base isolada e portas acústicas, com um volume de 63 m^3 , superior ao volume médio de 35 m^3 de cozinhas típicas, considerando diferenças entre as cozinhas e o fato da possibilidade de se utilizar mais de um sistema para as avaliações, e a realização da apresentação dos ruídos para mais de um jurado, justificando a necessidade de uma sala com um maior volume.

O ajuste final da sala foi a definição dos painéis absorsores para o ajuste do tempo de reverberação, sendo realizadas medições em cinco cozinhas de forma a determinar um tempo de reverberação médio destas, sendo realizada também o mesmo tipo de medição na sala de análise subjetiva. Estas medições foram realizadas utilizando-se como guia para validação dos resultados a norma ISO 354-1985 que determina os procedimentos para a medição da absorção sonora em câmaras reverberantes.

Segundo a norma quando uma fonte sonora é colocada dentro de um ambiente fechado, a forma com que o nível sonoro decresce, depois da fonte desligada, é determinado pelas características de absorção sonora das paredes da sala e dos objetos que se encontram dentro dela.

A taxa de decaimento ou redução do nível após o desligamento da fonte sonora em relação ao tempo é definida como tempo de reverberação, ou tempo de decaimento, e segundo a norma ISO R 354, na maioria dos casos, para frequências específicas ou bandas de frequências, o decaimento é aproximadamente exponencial com o tempo a partir da primeira reflexão, sendo determinado medindo-se o tempo necessário para a redução de 60 dB do nível de pressão sonora. Um exemplo da curva de decaimento está apresentado na Figura 3.2.

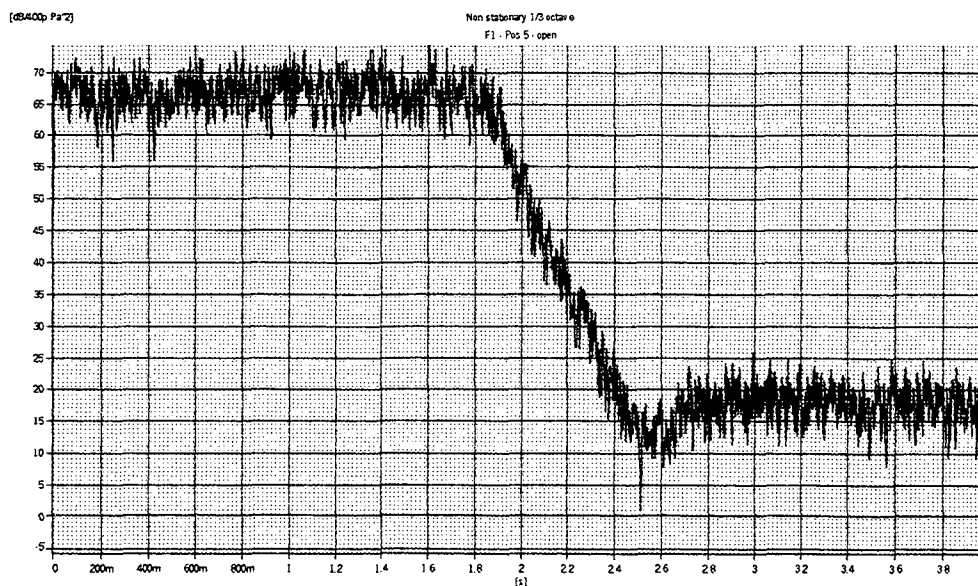


Figura 3.2 – Tempo de decaimento na banda de 2 kHz, este mesmo gráfico foi gerado para todas as bandas de 100 Hz a 10 kHz.

Os valores dos tempos de reverberação médios obtidos das medições nas cozinhas estão apresentados na Figura 3.3, havendo nestes valores um desvio padrão máximo de 0,9 s. Na Figura 3.4 estão apresentados os tempos de reverberação da sala de análise subjetiva comparados com a resposta média das cozinhas.

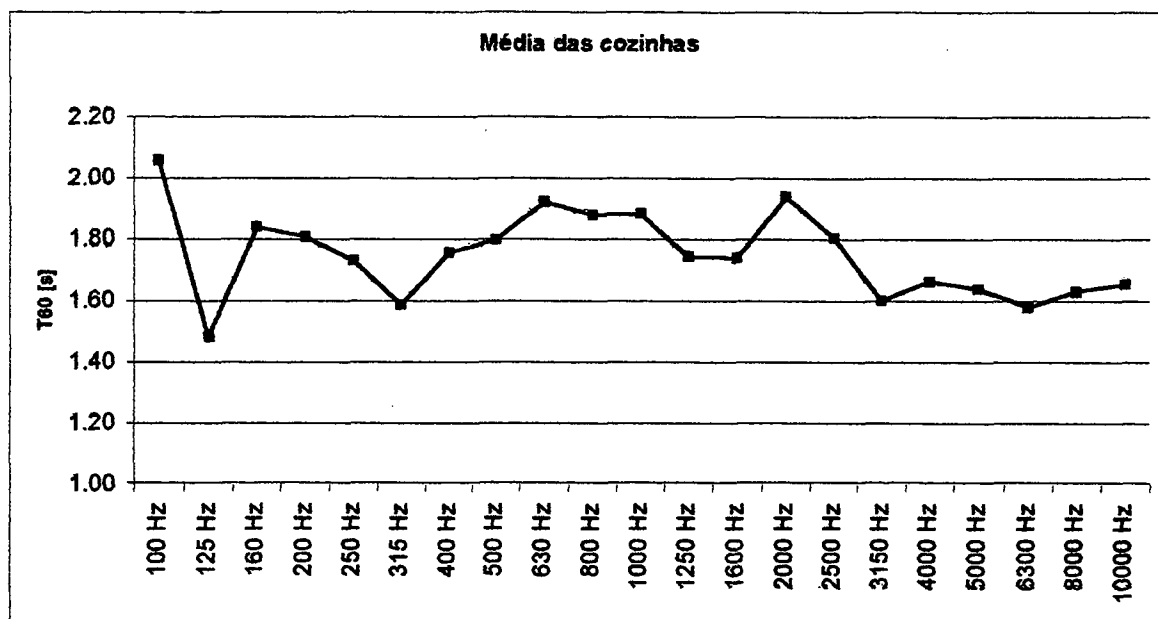


Figura 3.3 - Tempo de reverberação médio das cozinhas medidas

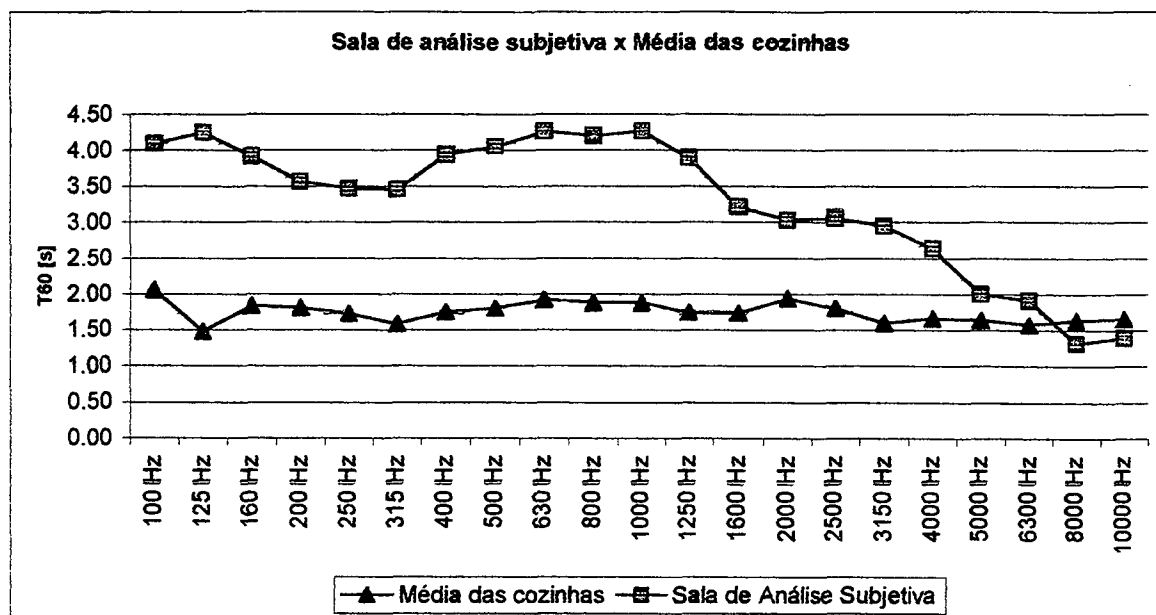


Figura 3.4 - Tempos de reverberação da sala de análise subjetiva em relação aos tempos de reverberação médio das cozinhas

A partir destes valores foram calculados os painéis necessários para que os tempos de reverberação da sala de análise subjetiva fossem semelhantes aos tempos médios das cozinhas. Os painéis selecionados para o ajuste dos tempo de reverberação foram os de membrana, para ajuste nas baixas frequências, e de chapa perfurada, para as médias e altas frequências.

A característica construtiva do painel de membrana com placa rígida baseia-se em um par de placas com diferentes espessuras, considerando-se que a mais espessa possui deslocamentos insignificantes comparados com os da mais fina.

O processo de dissipação de energia ocorre tanto no material da membrana quanto no material acústico colocado no interior do painel, em função da camada de ar existente entre as chapas oferecer uma resistência ao movimento da membrana. Pode-se incrementar

este amortecimento com a inclusão de material acústico entre as chapas, ou adicionando-se amortecimento estrutural à membrana.

O sistema descrito comporta-se como um sistema com um grau de liberdade, sendo que o excesso de amortecimento reduz a absorção na frequência de ressonância. O baixo amortecimento, entretanto, implica na pouca absorção do painel nas frequências adjacentes à de ressonância.

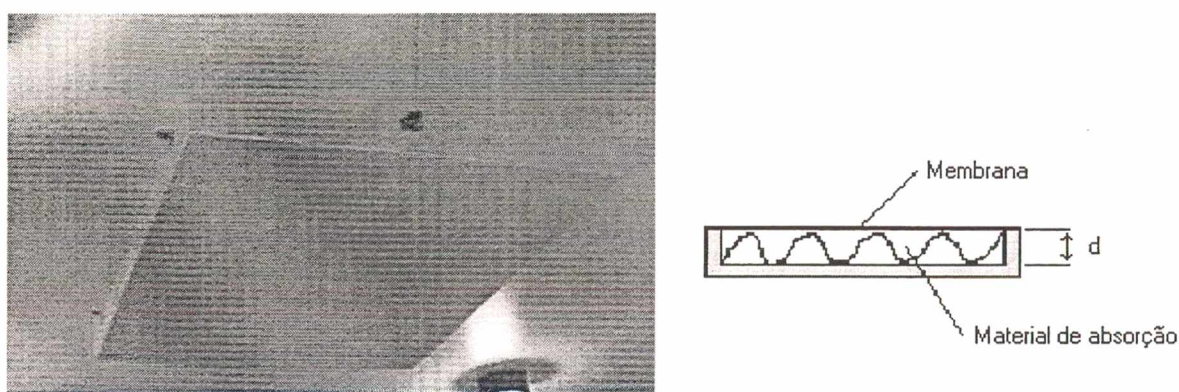


Figura 3.5 - Painel de absorção com placa rígida

Os painéis de membrana tiveram suas frequências de ressonância ajustadas para 125 Hz e 250 Hz, tendo forma construtiva conforme apresentado na Figura 3.5.

O painel de placa perfurada é semelhante ao de membrana, sendo que esta (a membrana) é substituída por uma placa rígida perfurada. A característica construtiva do painel faz com que os furos comportem-se de maneira semelhante a ressonadores de Helmholtz, apresentando uma característica de máxima absorção na região das médias frequências (entre 300 Hz e 2000 Hz aproximadamente).

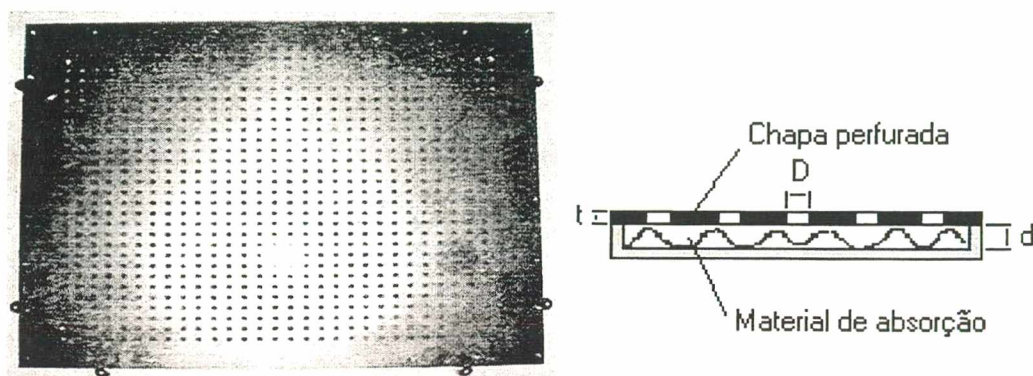


Figura 3.6 - Painel de absorção com placa perfurada

O material de absorção acústica selecionado foi a lã de vidro. O painel de chapa perfurada utilizou chapas de aço inox, sendo especificados painéis com frequências de máxima absorção em 1 kHz e 2 kHz.

Utilizando-se a teoria de Sabine para o cálculo do coeficiente de absorção sonora através do tempo de reverberação pode-se definir a área de painel necessária para a redução do tempo de reverberação na sala de análise subjetiva através da seguinte relação:

$$T = \frac{0,161 \cdot V_{Sala}}{(A_{Sala} - A_{Painel}) * \alpha_{Sala} + A_{Painel} * \alpha_{Painel}}$$

Aplicando-se os valores de tempo de reverberação medidos e considerando painéis ajustados nas frequências de 125 Hz, 250 Hz, 1 kHz e 2 kHz, os valores calculados das suas áreas foram, respectivamente, 4 m², 2 m², 3 m² e 1 m², totalizando 10 m² de painéis na sala. Após a determinação da área total de painéis foram determinadas as dimensões dos mesmos de forma que todas as faces da sala, excetuando-se o piso, apresentassem painéis, a fim de evitar a concentração de amortecimento em determinadas áreas da sala.

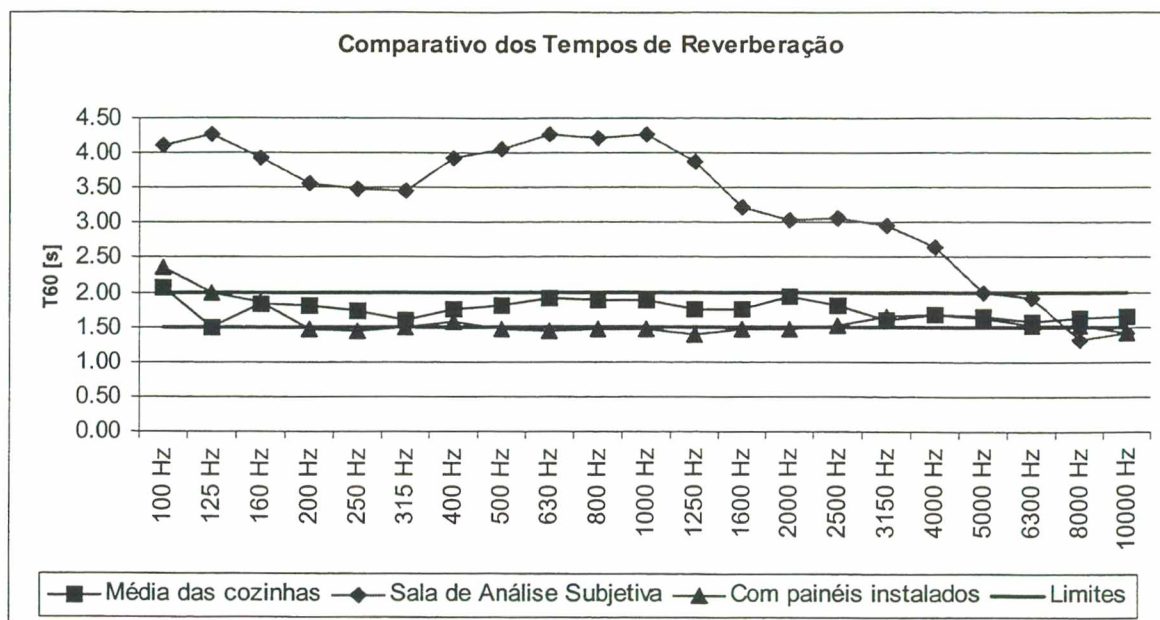


Figura 3.7 - Tempo de reverberação da sala de análise subjetiva, valores médios das cozinhas e o calculado com os painéis.

Foram definidos tempos limites entre 1,5 s e 2 s para o tempos a serem alcançados com a instalação dos painéis na sala de análise subjetiva, sendo os resultados apresentados na Figura 3.7. Pode-se perceber que este objetivo foi plenamente atingido, e que a determinação das áreas de painéis para a redução dos tempos de reverberação foram de boa precisão, permanecendo muito próximos dos limites estipulados.

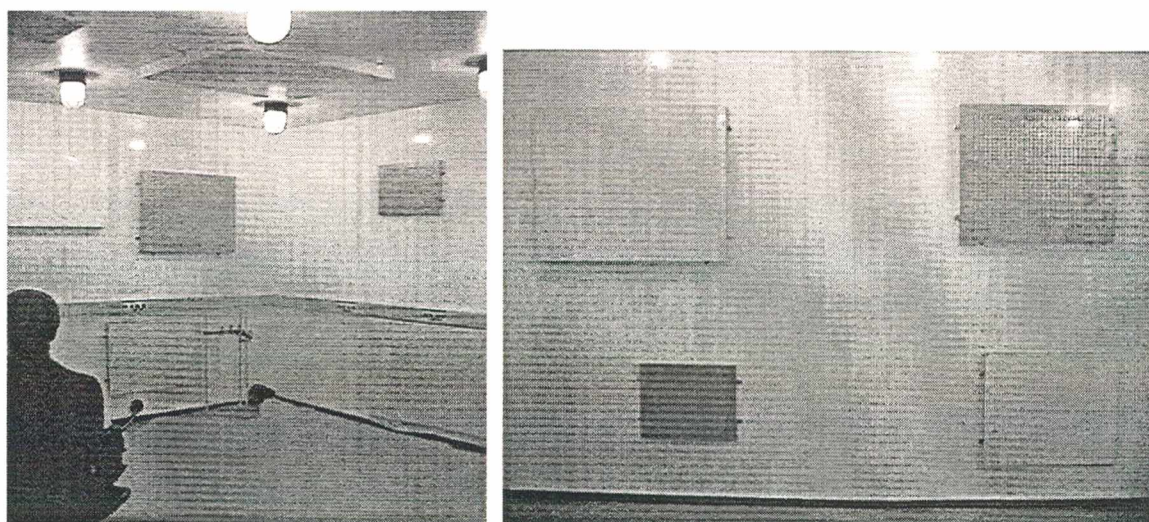


Figura 3.8 - Painéis instalados na sala de análise subjetiva.

3.2 Seleção das fontes para análise

O elemento primordial para o desenvolvimento das análises subjetivas é a seleção da fonte que será utilizada na avaliação de júri, pois esta será a única referência dos jurados em relação ao ruído emitido pelas fontes.

A recomendação é de que os produtos utilizados sejam retirados preferencialmente das linhas de montagem, para que representem a realidade encontrada pelo consumidor no momento da compra do produto, sendo um com sinal representativo da média de no mínimo três produtos.

Cuidados adicionais devem ser tomados em relação aos modelos a serem comparados, que no caso de apresentarem mesmas características técnicas mas modelos diferenciados, devem ser apresentados de maneira que se garanta a perfeita apresentação dos ruídos, mas que não haja interferência da forma na avaliação dos jurados. Estes tópicos serão melhor explorados no item referente à apresentação dos sinais ao júri.

3.3 Gravação dos sinais

O sinal utilizado para as avaliações subjetivas é um sinal amostrado no domínio do tempo, sendo adquirido através de um microfone ou de um sistema simulador de tronco e cabeça. Em seguida, este sinal é processado e analisado em um software específico para análise dos parâmetros de psicoacústica.

Conforme já mencionado, as formas de gravação do sinal para análise psicoacústica podem ser de duas formas: através de um microfone, captação monaural, ou através de um conjunto simulador cabeça e tronco, cuja a função é simular a presença do corpo

humano no campo sonoro. O simulador possui um par de microfones colocados na posição dos ouvidos, dita captação binaural.

O fator que determina a diferença entre as duas formas de captação do sinal para gravação é, principalmente, a possibilidade da determinação da diretividade, que é a capacidade de reconhecimento da posição da fonte sonora, e a consideração das distorções que a presença do corpo humano provoca no campo acústico, possibilitados pela captação binaural.

O sistema de captação binaural tem uma estrutura similar a de um tronco e cabeça humana, revestido de material destinado a fornecer uma absorção similar a de uma pessoa, e possuindo orelhas de material especial de forma a apresentar a mesma textura da cartilagem e com um formato quase idêntico à mesma. Isto permite simular de forma mais próxima possível a presença de uma pessoa no campo sonoro, resultando na função transferência mostrada na Figura 3.9, para um campo difuso, quando comparada com uma medição mononaural.

Para garantir-se que a qualidade da gravação e, conseqüentemente da reprodução dos ruídos, gravados através do sistema binaural, ou torso, são realizadas duas calibrações, a primeira realizada diretamente nos microfones, individualmente, para calibração dos níveis de pressão captados pelos mesmos.

A segunda calibração é realizada utilizando o software PULSE SQ, onde os fones de ouvido são colocados no torso e, através de um sinal reproduzido pelo software e reamostrado pelo torso, determina-se uma curva que representa as distorções provocadas pelo sistema de reprodução, neste caso os fones de ouvido, que será utilizada para compensar o sinal amostrado no momento da sua reprodução para o júri. Estes ajustes devem ser realizadas antes da gravação dos sinais para garantir a sua fidelidade no

momento da sua reprodução ao júri. Detalhes do Manikin MK1 Cortex são mostrados na Figura 3.10.

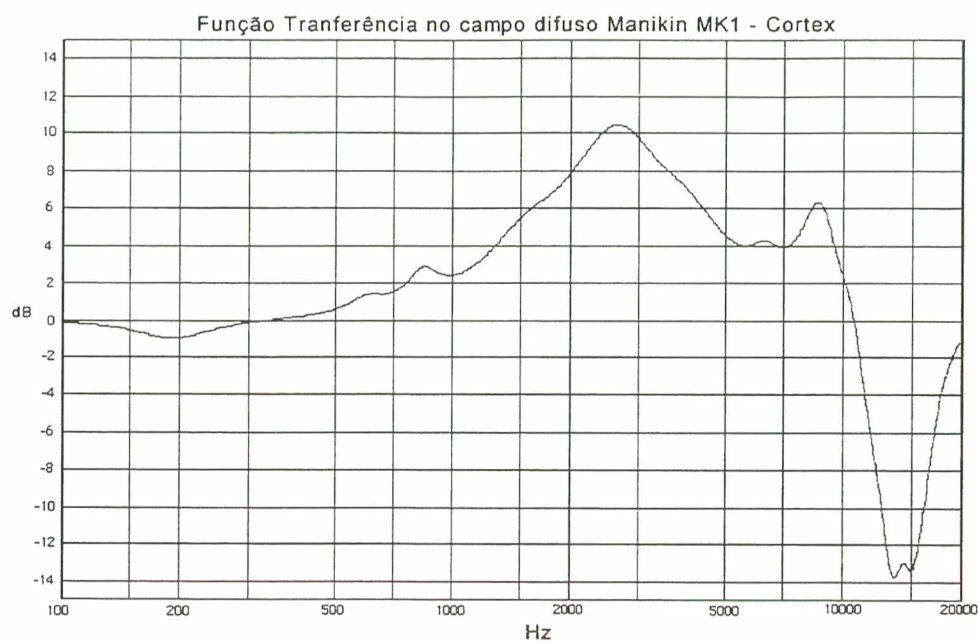


Figura 3.9 - Função transferência do sistema de captação binaural do Manikin MK 1 Cortex (torso) em campo difuso.



Figura 3.10 - Fotos do Manikin MK1 Cortex (torso) e detalhes da cabeça, orelha e posicionamento do microfones.

A configuração do posicionamento do torso e do microfone no momento da gravação devem ser considerados, de forma que representem o mais fielmente possível o posicionamento do usuário no momento da gravação dos ruídos. Diferenças ocorrem na avaliação de ruídos de automóveis com o torso posicionado como passageiro ou motorista dentro do automóvel. O posicionamento utilizado para a gravação dos sinais dos sistemas de refrigeração está representado na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Exemplo do posicionamento do Manikin MK1 Cortex (torso) para a gravação de um sistema de refrigeração.

3.1 Reprodução e composição dos sinais para a avaliação de júri

Para a reprodução dos sinais podem-se considerar caixas de som ou fones de ouvido como vias de reprodução digital, ou a apresentação direta que utiliza a própria fonte do ruído. Para esta apresentação, porém, deve-se compor a forma com que os ruídos que serão reproduzidos, considerando o seu agrupamento e os tempos de exposição aos jurados.

3.4.1 APRESENTAÇÃO DIRETA E VIAS DE REPRODUÇÃO DIGITAL

A forma mais simples de reprodução dos sinais é aquela onde a fonte do ruído é colocada diretamente em contato com o jurado para que este o avalie. Porém algumas características dos produtos devem ser consideradas nestas apresentações, principalmente quanto à estabilização da fonte de ruído, como nos sistemas de refrigeração por exemplo, onde durante a partida do compressor tem-se ruídos distintos daqueles obtidos com o sistema já estabilizado.

Além da estabilização existe a possibilidade de interferência de ruídos residuais que ocorrem após o desligamento do produto que podem afetar a avaliação, já que estas avaliações são sempre comparativas e tem-se no mínimo um segundo produto para comparação, ocasionando mais uma incerteza na avaliação do jurado.

Quanto à reprodução dos sinais digitais, ela pode ser realizada por caixas de som ou fones de ouvido, pois apresentam a vantagem de permitirem a repetição do sinal e uma composição de ordem conforme for mais adequada para a avaliação subjetiva. Porém, em ambos os casos, a resposta de frequência e as distorções não lineares produzidas pelos transdutores é de grande importância. A Figura 3.12 mostra a resposta em frequência de uma caixa contendo três alto falantes.

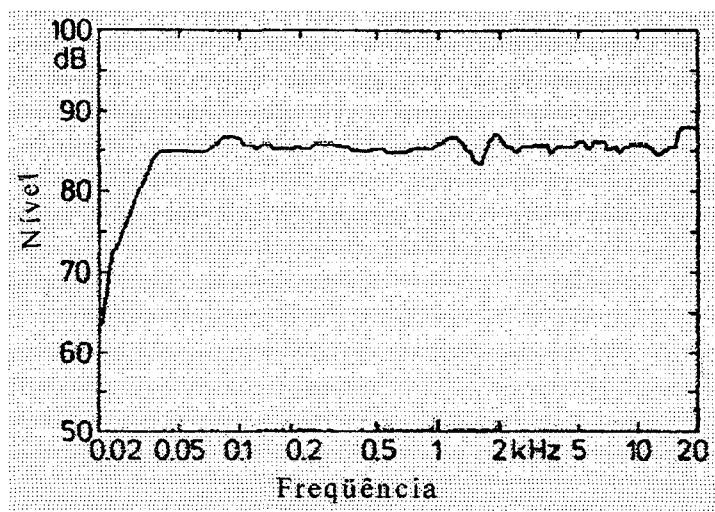


Figura 3.12 – Resposta em frequência de uma caixa acústica com três alto-falantes em uma câmara anecóica. [11]

A resposta em frequência deste conjunto, quando medido em uma câmara anecóica, é linear com incertezas de ± 2 dB, numa faixa de frequência entre 35 Hz e 16 kHz. Para aplicações psicoacústicas, fatores de distorções de apenas 0,1 % ou menos são permitidos, correspondendo no caso da Figura 3.12 a uma diferença de nível de 60 dB, já que o nível médio do sinal é de 85 dB, ou seja, distorções com no máximo 25 dB são aceitáveis.

Se os sons são reproduzidos por caixas em ambientes que não sejam câmaras anecóicas, como uma sala de estar, por exemplo, ocorrem complicações adicionais, pois a característica de resposta em frequência da sala será superposta à característica de resposta em frequência da caixa de som.

Na Figura 3.13 tem-se um exemplo deste efeito. A linha pontilhada no painel da esquerda representa a característica de resposta em frequência da caixa de som medida numa câmara anecóica, e a linha sólida representa a resposta em frequência da mesma caixa de som numa sala de estar. A partir dos dados mostrados na Figura 3.13A, torna-se claro que as ressonâncias da sala alteram distintamente a resposta em frequência da

combinação. A Figura 3.13B mostra parte da resposta em frequência da sala e da sala somada com a caixa de som numa escala de frequência expandida.

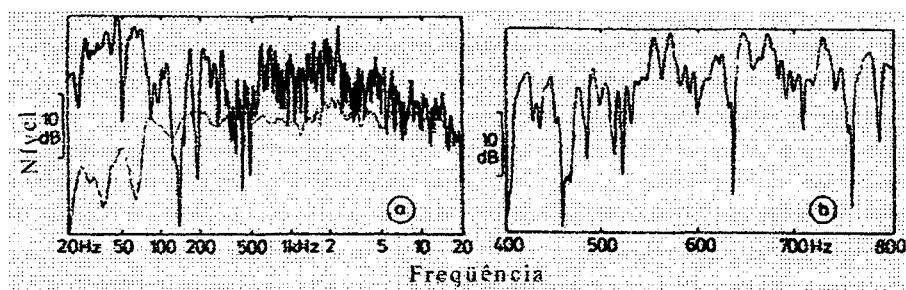


Figura 3.13 – (a) Resposta em frequência de uma caixa de som numa sala de estar (linha sólida) e numa câmara anecóica (linha pontilhada). O painel (b) mostra, em escala expandida, a resposta na sala de estar. [11]

Este gráfico revela pontos de quedas bruscas e estreitas na resposta em frequência, mesmo quando a frequência de tons puros varia muito pouco de valor. Estas pequenas variações de frequência são transformadas em uma grande variação em amplitude, o que leva a uma diferença claramente audível de “loudness”.

Estes problemas podem ser na sua maioria evitados se os sinais forem apresentados via fones de ouvidos. A vantagem do uso de fones de ouvido em experimentos psicoacústicos é de apresentarem uma pequena distorção não linear (menor que 0,1 % ou -60 dB) na faixa de frequência de interesse. Apresentam, também, a vantagem de apresentarem menores restrições quanto ao local para reprodução e sofrendo uma menor influência do ruído de fundo.

3.4.2 COMPOSIÇÃO DOS GRUPOS E TEMPOS DE REPRODUÇÃO

Com a definição da via de reprodução, deve-se avaliar a forma de apresentação dos sinais aos jurados, por comparação de pares, onde os ruídos são comparados dois a dois, e

na comparação de grupos, onde grupos de ruídos são apresentados e a avaliação é feita pela comparação de uns com os outros.

Avaliações com apresentação de pares são realizadas normalmente através de apresentação via fones de ouvido, estas apresentações são as mais precisas em termos de resultados comparativos entre os ruídos, porém são os que mais tempo exigem dos jurados, pois existem duas verificações necessárias para a confirmação estatística dos resultados. Devem ser preparados pares de sinais onde são apresentados os mesmos sinais no mesmo par(sinal A com sinal A), para se determinar a confiabilidade das respostas, e os pares apresentados devem ser apresentados novamente, porém com ordem invertida (par [A,B] e par [B,A]), para a determinação da repetibilidade das respostas.

Para a análise dos compressores e dos sistemas de refrigeração decidiu-se pela utilização da análise em grupos de sinais, pois o desgaste é menor para os jurados e apresenta resultados confiáveis, já que existem diferenças significativas entre os sinais.

Esta necessidade na composição dos grupos de ruídos para apresentação, onde possa ocorrer a repetição dos ruídos já reproduzidos, é a grande diferenciação entre a apresentação direta e a digital, pois na apresentação digital tem-se a possibilidade da repetição dos sinais, com a garantia da reprodução sempre do mesmo sinal, o que não pode ser garantido com o acionamento repetitivo de um produto quando a compreensão a respeito do mesmo não for alcançada pelos jurados.

Além disso, embora possua a vantagem da menor possibilidade de distorções em função da reprodução do sinal de realizada diretamente ao jurado, a apresentação direta tem a necessidade de uma sala com características acústicas controladas, para evitar distorções no campo devido à reverberação ou absorção excessiva e a existência de ruído de fundo, o que levanta questões a respeito de quanto a presença de mais de um jurado na

sala pode distorcer o campo acústico e a percepção do próprio ruído, dificultando mais ainda a realização de júris com um maior número de pessoas.

A determinação do tempo de duração dos sinais utilizados na apresentação, bem como o número de sinais agrupados para a comparação, é fator primordial na compreensão dos mesmos. Se os sinais ou os grupos forem excessivamente longos ou em grande quantidade, além de dificultarem a compreensão para a avaliação podem causar fadiga e irritação nos jurados.

Inicialmente definiu-se quais os tempos de reprodução dos sinais ideais para os compressores e sistemas de refrigeração, através de experimentos com ruídos semelhantes, para verificar o discernimento, e com grandes diferenças, para verificar o desconforto dos jurados.

Concluiu-se que o tempo de reprodução de cada ruído não pode ser considerado como fixo, pois ruídos com grande semelhança entre si mostraram ser melhor avaliados quando sua duração estava em torno de 10 segundos, devendo esta duração ser reduzida para 5 segundos quando apresentados ruídos com grandes diferenças entre si, pois os jurados mostraram desconforto em relação ao tempo excessivo para diferenciar sinais tão distintos.

Quanto ao número de sinais para a comparação observou-se que quanto maior a diferença entre os sinais maior o número de sinais que podem ser incorporados aos grupos, não sendo recomendado a apresentação de mais de seis sinais por grupo para os compressores e sistemas de refrigeração.

Um fator importante a ser considerado, ainda, é a própria característica dos ruídos a serem analisados, pois alguns experimentos iniciais mostraram que estas diferenças influem diretamente na receptividade dos jurados. Estes aceitaram, por exemplo, com

muito mais facilidade um número maior de ruídos de motores de automóveis do que ruídos de diferentes secadores de cabelos, mesmo tendo avaliado em ambos os grupos ruídos extremamente desagradáveis.

3.5 Seleção do júri e composição do questionário

O principal referencial para a determinação das correlações das métricas de psicoacústica com o ruído do produto é a análise de júri, que é a apresentação do ruído a um grupo de pessoas selecionadas com o propósito de avaliar as características do ruído do produto.

Este grupo deve ser selecionado preferencialmente entre os usuários do produto, podendo-se, ou não, diferenciá-los em relação ao tempo de exposição direta do ruído do mesmo, idade, faixa de renda a que se propõe a venda, ou outros fatores que sejam relevantes segundo o avaliador.

A forma mais usual de se determinarem os parâmetros para seleção do grupo de júri é através de um questionário sócio econômico, onde as questões apresentadas acima, como idade, sexo, faixa salarial, estado civil, são apresentadas, possibilitando a seleção do grupo.

É claro que a análise de júri pode ser feita utilizando um grupo com características distintas e seus componentes serem selecionados posteriormente pelos seus dados, possibilitando uma análise comparativa entre grupos. A única exceção tida como regra geral em avaliações subjetivas é a de sempre utilizarem-se pessoas não ligadas à área de aplicação do quesito analisado, neste caso profissionais de acústica.

A seleção dos jurados deve prever também a determinação da capacidade do jurado em avaliar o quesito selecionado, neste caso através de uma avaliação da capacidade auditiva, para que não se invalidem os resultados do júri. Sendo esta também uma razão

para não se utilizarem pessoas relacionadas às áreas de concentração da característica avaliada, pois estes terão uma possibilidade de análise crítica muito mais apurada, podendo não refletir a real opinião dos possíveis consumidores.

Para a avaliação dos ruídos dos compressores e dos sistemas de refrigeração desenvolveu-se um questionário dividido em três partes. Na primeira são coletados os dados sócio-econômicos do jurado, na segunda são avaliados os ambientes de trabalho e residência, e na terceira é realizada a avaliação dos ruídos em si. Existe ainda, um questionário final onde o jurado aponta as suas impressões em relação ao conjunto das avaliações.

O questionário sócio-econômico apresenta questões como a idade, estado civil, renda familiar, nível de escolaridade, que são dados necessários para se determinar qual a faixa de mercado na qual estes jurados estão inseridos, determinando assim a quais produtos as suas opiniões podem ser consideradas como determinantes para alterações no mesmo. Estes dados também são importantes para que se possa determinar uma homogeneidade, ou não, dos grupos nas avaliações.

O questionário para avaliação do perfil de exposição ao ruído dos jurados foi incorporado em função do próprio objetivo final do trabalho, ou seja, a avaliação subjetiva de ruídos. As questões apresentadas determinam o tipo de ruído a que o jurado fica exposto no lugar onde mora e no seu local de trabalho, solicitando também a descrição de ruídos que o incomodem em especial. A partir deste questionário pode-se também determinar um possível perfil de consumidor mais sensível a determinadas características dos ruídos em função da exposição que sofre no seu dia-a-dia.

O questionário de avaliação dos ruídos é o ponto mais importante de todo processo, pois é ele quem irá apontar a sensação real do jurado, fornecendo parâmetros para o futuro

desenvolvimento dos produtos. Assim, o seu objetivo deve ser o de permitir que o jurado possa responder com o mínimo de influência externa a sua percepção do ruído, porém, de uma maneira que forneça dados suficientes ao avaliador para a diferenciação entre os ruídos.

Para se alcançar este objetivo foram desenvolvidos questionários com escalas diversas, utilizando como referência avaliações de caixas de som apresentadas por Borwick [2] e comentários sobre a aplicação de diferentes escalas feitas por Lyon [14]. Estes questionários apresentam como diferencial em suas graduações, que variam da melhor avaliação à pior, na forma com que as escalas são apresentadas, podendo ter simples representações gráficas, graduações numeradas ou através da avaliação por notas.

Questionários mais sofisticados apresentam também termos chave para que os jurados descrevam os ruídos percebidos, esta forma de descrição porém, apenas é alcançada após um trabalho de reconhecimentos dos ruídos mais comuns, quais as suas fontes e como descrevê-las, para que assim se possa atuar diretamente sobre a fonte específica do ruído que causa incômodo. No Anexo 1 está apresentado um exemplo de questionário que utiliz termos chave para a descrição dos ruídos.

A forma da escala escolhida foi baseada em experimentos onde foram utilizados ruídos com grande semelhança, para determinar o discernimento entre os sinais, e ruídos com diferenças acentuadas, para verificar a irritabilidade. A partir dos resultados das avaliações concluiu-se que a forma que apresentava maior facilidade para a realização da avaliação foi a de escala sem numeração, pois a mesma, segundo a opinião dos jurados, apresentou uma facilidade maior na resposta em função de não necessitar uma racionalização em termos numéricos da avaliação.

Esta estrutura para a escala pode não ser conclusivamente a ideal para a avaliação de compressores e sistemas de refrigeração, pois o número de jurados utilizados para a sua determinação foi pequeno (5 jurados), em função do grande tempo necessário para a realização das avaliações, sendo necessária uma pesquisa em maior escala para que se possa determinar realmente qual a melhor forma de apresentação da avaliação, podendo até mesmo existir variações em termos de produtos e características que se desejam avaliar.

Além da escala, no questionário de avaliação do ruído foram introduzidas quatro questões relacionadas às quatro características fundamentais nas quais os parâmetros da psicoacústica se baseiam, ou seja, as componentes de graves, agudos, modulações e tons puros, sendo que estas questões foram formuladas em função da necessidade de uma resposta mais completa dos jurados em relação às características dos sinais do que apenas a preferência em relação aos sinais.

O questionário final utilizado para a análise encontra-se no Anexo 2.

3.6 Apresentação dos ruídos aos jurados e análise dos resultados

Tanto a apresentação direta, quanto a apresentação digital, podem ser realizadas permitindo a apresentação da forma do produto ao jurado ou não. No caso da apresentação da forma do produto ao jurado deve-se atentar ao fato de que a aparência do mesmo pode causar diferenças na avaliação, conforme pode ser percebido no exemplo abaixo, já que a análise que está se desenvolvendo é subjetiva, sendo influenciada por todos os fatores externos que possam interagir com o jurado.

Na Figura 3.14 apresenta-se uma avaliação de júri de quatro conjuntos de caixas acústicas considerando a sua fidelidade, no conjunto de respostas da direita (oculto) os jurados não tiveram acesso a apresentação do produto final. Já no conjunto da esquerda

(visível) o produto final foi apresentado, sendo que os dois primeiros conjuntos possuíam aparência impressionante e cara, o terceiro uma aparência simples e barata, e o quarto era um conjunto simples porém conhecido. A conclusão é clara diante dos resultados. A aparência foi um fator decisivo na valorização, ou depreciação, da opinião dos jurados.

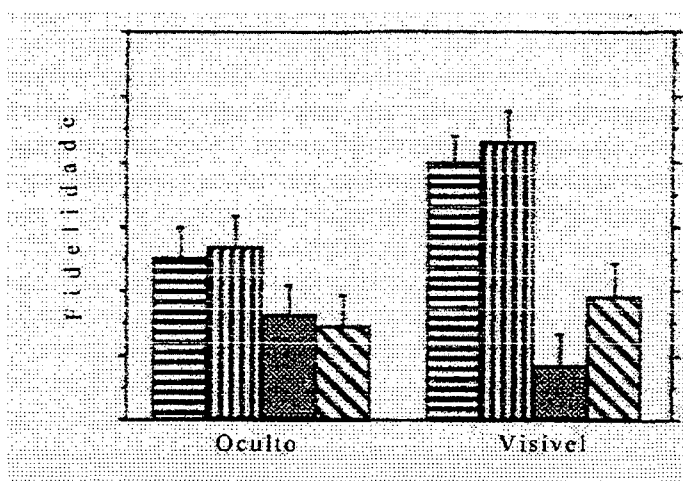


Figura 3.14 - Comparação de avaliações da fidelidade de caixas acústicas sem a apresentação da forma (oculto) e com a apresentação da forma (visível) das mesmas. [2]

O posicionamento do jurados na sala de avaliação subjetiva deve ser considerado, na apresentação direta deve-se observar como a diferença da colocação de mais de um jurado na sala, que incorrerá no posicionamento diferenciado entre eles, irá influir na avaliação e nas respostas encontradas.

Como citado anteriormente, os jurados são suscetíveis a quaisquer estímulos externos, assim fatores como o conforto da cadeira, posição para preenchimento do questionário, temperatura da sala, horário, próximo do almoço, por exemplo, antes a fome e depois o sentimento de relaxamento, a pressa de finalizar o questionário por qualquer motivo, o nervosismo por problemas são todos fatores que influenciarão na resposta dos jurados.

Este fatores e outros que possam estar relacionados com a interferência na capacidade de julgamento dos jurados são o grande desafio a ser superado pelas avaliações subjetivas, pois todos podem de alguma forma alterar os resultados obtidos, cabendo ao avaliador no momento da avaliação observar os jurados e excluir os questionários que considerar com respostas alteradas ou influenciadas por algum fator externo.

4 APLICAÇÃO DO CONCEITO DE QUALIDADE SONORA EM COMPRESSORES E SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Neste capítulo serão mostrados os resultados da análise subjetiva em compressores distintos operando isolados e quando instalados em um sistema de refrigeração. A partir dos resultados obtidos com as medições foram determinadas as correlações das métricas da psicoacústica com as avaliações dos jurados.

Para a validação dos procedimentos apresentados realizou-se inicialmente uma análise de júri completa, com o intuito de iniciar a investigação a respeito de quais as métricas de psicoacústica apresentam melhor correlação com o ruído do compressor.

A cadeia de medição seguiu a seqüência apresentada no fluxograma mostrado na Figura 4.1, sendo adotada esta cadeia para todas as medições. A condição de operação dos compressores para as medições foi a condição Cecomaf, que apresenta as condições de pressão para a avaliação de compressores, e a condição de funcionamento dos sistemas de refrigeração foram os determinados pela Embraco de acordo com os procedimentos internos da empresa.

Para a realização da análise de júri foram selecionados quatro compressores de diferentes modelos e quatro sistemas de refrigeração idênticos, sendo medidos os níveis de ruído dos compressores e dos sistemas de refrigeração, utilizando estes mesmos compressores.

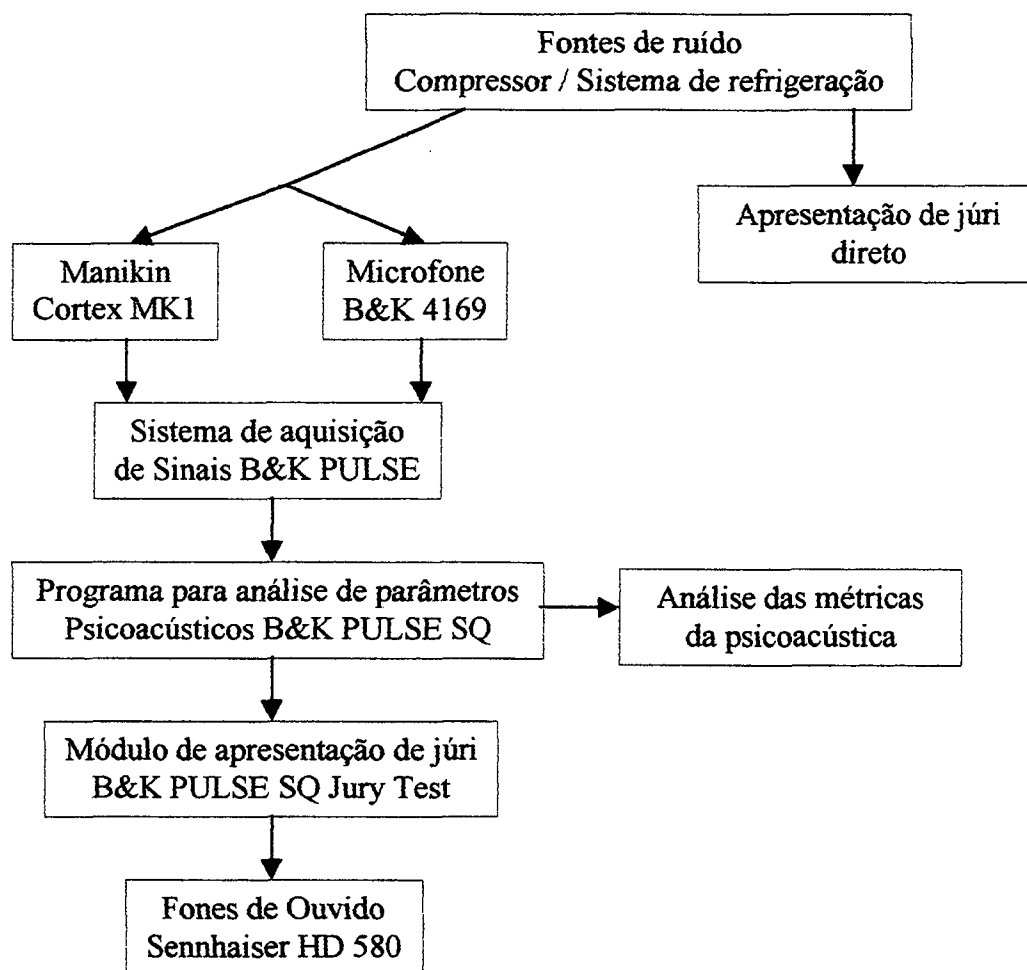


Figura 4.1 - Fluxograma representando a cadeia de medição utilizada no experimento.

A configuração da sala de análise subjetiva para as medições dos sistemas e compressores, e as posições do microfone e do torso estão mostrados na Figura 4.2. As dimensões da sala são 4,5 m x 5,0 m, sendo o sistema de refrigeração posicionado a 0,15 m da parede e na posição central da parede de 5,0 m, o compressor foi posicionado à uma distância de 0,5 m de cada face das paredes, em função das dimensões das conexões necessárias para o seu funcionamento desacoplado do sistema de refrigeração.

Embora o posicionamento do compressor tenha sido diferente do posicionamento do sistema de refrigeração não houve diferenças nas medições, pois a sala apresenta as

características de câmara de reverberação e o posicionamento do torso e do microfone respeitaram as distâncias utilizadas para o sistema de refrigeração.

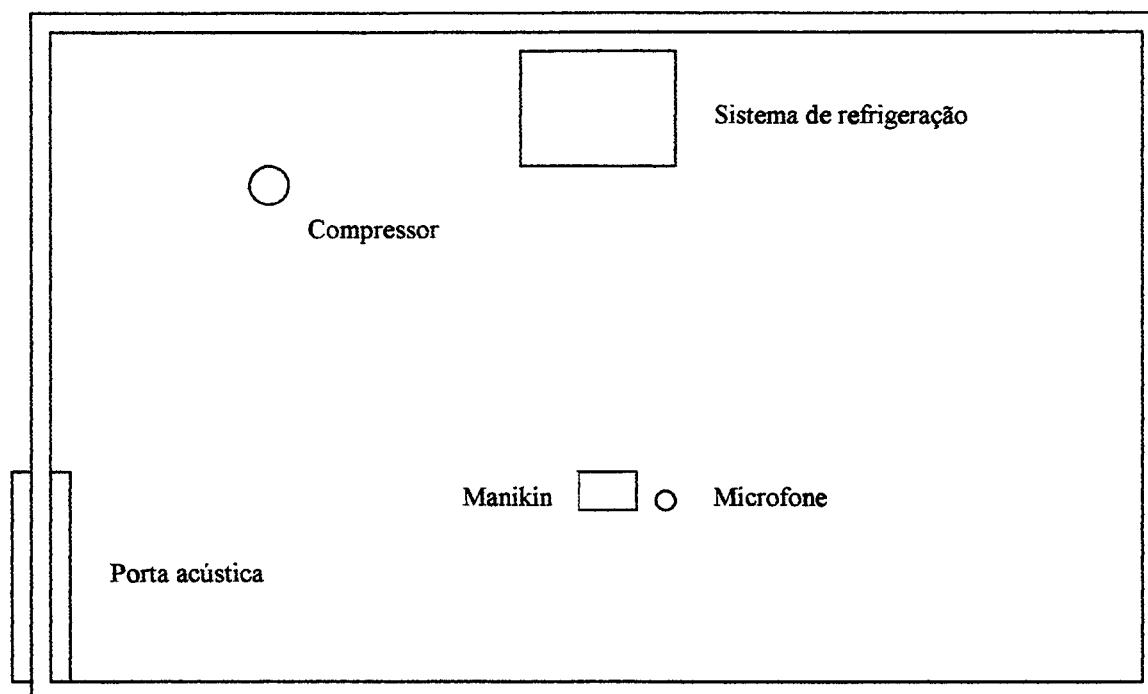


Figura 4.2 - Esquema da distribuição dos equipamentos na sala de análise subjetiva.

Foram definidos três instantes para a avaliação do ruído dos sistemas de refrigeração, uma medição na partida do compressor, uma medição com o compressor em funcionamento e outro no momento do desligamento do compressor. Como os sistemas de refrigeração selecionados apresentam um sistema de controle de partida dos compressores com termostato mecânico, que produz um ruído que mascara a partida do compressor foram instaladas chaves para que os compressores pudessem ser acionados independentemente da ação do termostato.

As medições foram realizadas na sala de análise subjetiva utilizando-se o torso, que foi posicionado de forma a representar uma pessoa com uma altura média de 1,65 m em pé

diretamente à frente da fonte de ruído, que é a posição mais usual de uma pessoa dentro de uma cozinha, sendo posicionado ainda um microfone próximo ao torso para comparação dos dados com os coletados com o mesmo. O torso e o microfone foram posicionados à 2 m de distância da fonte sonora, o compressor ou o sistema de refrigeração.

A forma de gravação, bem como os parâmetros adotados para a mesma foram sistematizados de forma que não houvesse alterações em função de diferenças de ajustes durante as gravações nos equipamentos.

Os sinais gravados e analisados foram apresentados a um júri composto por quinze elementos, todos selecionados dentro da fábrica, sendo quatro da área administrativa, quatro da produção, três da área de engenharia e quatro especialistas em acústica, sendo estes incluídos para a observação do quanto o conhecimento específico do quesito analisado, o ruído, influi na avaliação.

Foram selecionados quinze elementos apenas em função do grande tempo necessário para a realização do conjunto de avaliações de ruídos e da disponibilidade limitada da sala de análise subjetiva, que é utilizada também para outros fins. Além destes motivos, a própria disposição a cooperar com o experimento, ou a disponibilidade de tempo para participar das análises do jurado convidado, são elementos limitadores para a composição de um grupo de avaliação.

Para este primeiro experimento, onde se desejam determinar as características de correlação da avaliação de júri com as métricas da psicoacústica, e avaliar os procedimentos da análise de júri, o número de jurados é pequeno, devendo ser analisado pela empresa um número que se possa considerar representativo em função do número de consumidores de compressores / sistemas de refrigeração.

Tabela 4.1 - Dados sócio-econômicos dos jurados

| Idade média | Sexo | Estado civil | Filhos |
|-------------|--------------|--------------|-----------------------|
| 31,4 anos | Masculino: 9 | Solteiro: 4 | Nenhum: 10 |
| | Feminino: 6 | Casado: 11 | Média dos demais: 2,2 |

Os dados sócio econômicos dos jurados são apresentados na Tabela 4.1, sendo que em relação à escolaridade 4 apresentaram o segundo grau, 3 o segundo grau técnico, 2 o superior incompleto, 2 o superior completo e 4 pós graduados. Quanto a avaliação dos ruídos a que são expostos 7 jurados classificaram que em suas casas o ambiente é agradável e 8 indicaram que é apenas aceitável, e no trabalho 3 consideraram o nível de ruído a que estão expostos normal e 12 consideraram apenas aceitável.

4.1 Avaliação dos compressores

Os compressores foram testados apenas com a apresentação via fones de ouvido, devido à dificuldade na preparação de uma estrutura para montagem dos quatro compressores para a apresentação direta.

Os compressores foram denominados C1, C2, C3 e C4, apresentando todas capacidades de refrigeração semelhantes, entre 550 e 800 BTU/hora, e apresentando níveis de ruído e de "loudness" conforme mostrados nas Figuras 2 a 9, sendo que o nível de referência zero é o mesmo para todos os gráficos.

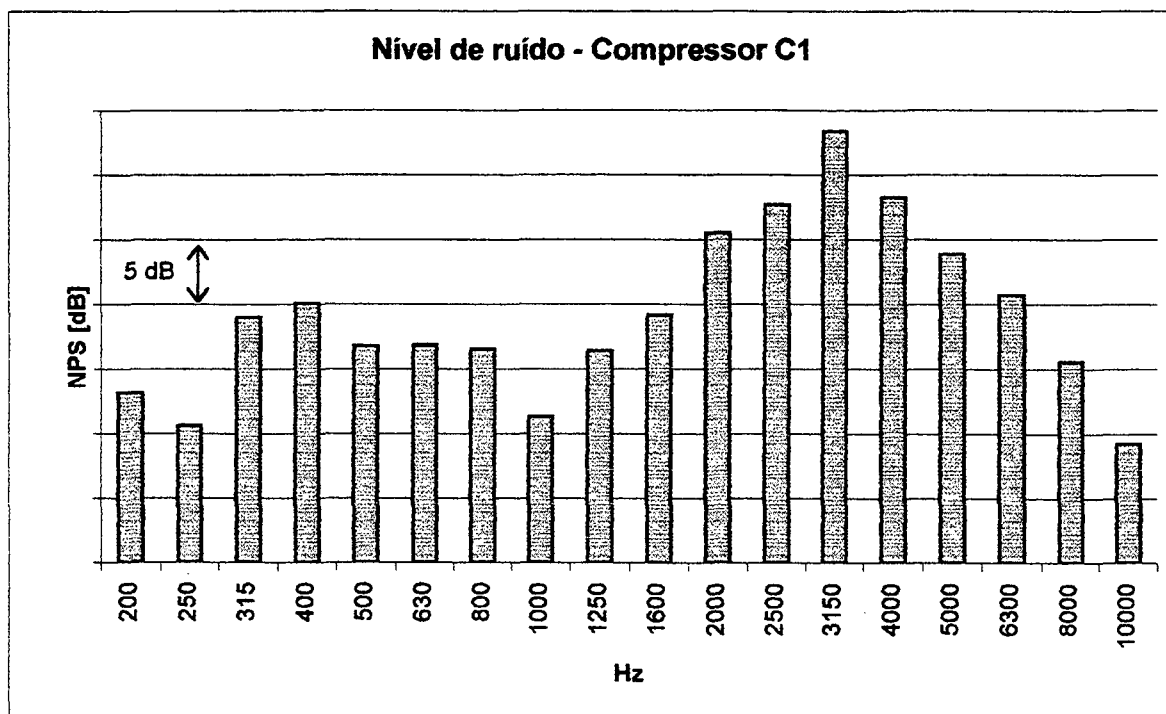


Figura 4.3 - Nível de pressão sonora (NPS) do compressor C1, em bandas de 1/3 de oitava.

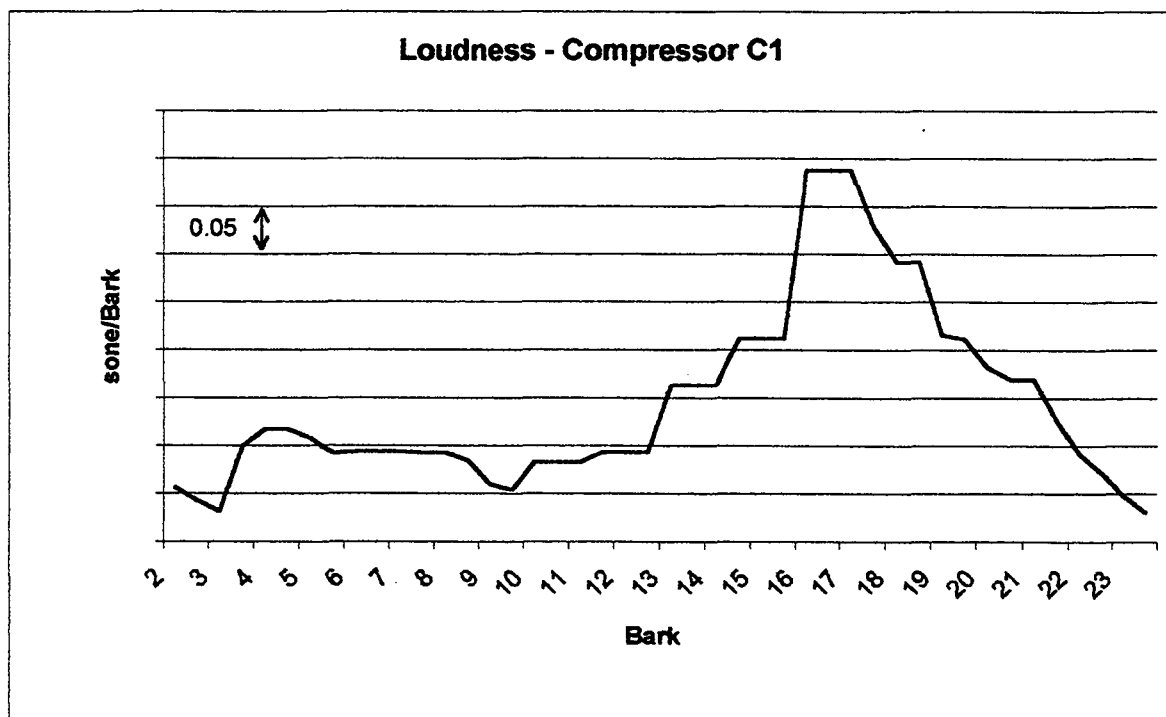


Figura 4.4 - "loudness" do compressor C1.

Observando as Figuras 4.3 e 4.4 percebe-se que os altos níveis de ruído na região da banda de 3.150 Hz produz no “loudness” uma elevação na região de 16 à 18 Bark, apresentando maior semelhança à distribuição das freqüências nesta região do que nas regiões de baixas e médias freqüências (a banda de 1.600 Hz equivale a aproximadamente 12 Bark).

Nas Figuras 4.5 e 4.6 estão representadas as respostas do compressor C2. Pode-se constatar a mesma relação entre o espectro de ruído e o “loudness”, observando-se que há uma região adicional em destaque, na banda de 630 Hz, que também aparece no “espectro” de “loudness”, e que a região de destaque nas freqüências a partir da banda de 4.000 Hz apresenta uma maior influência no aumento da área do “loudness” .

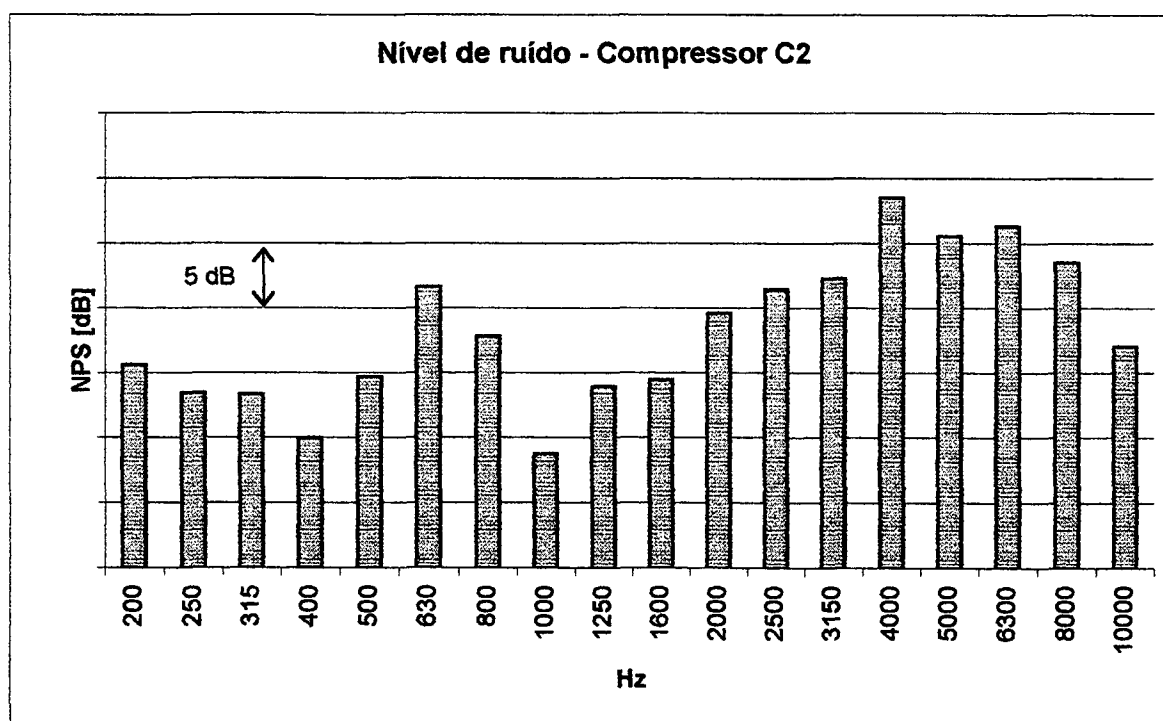


Figura 4.5 - Nível de pressão sonora (NPS) do compressor C2, em bandas de 1/3 de oitava.

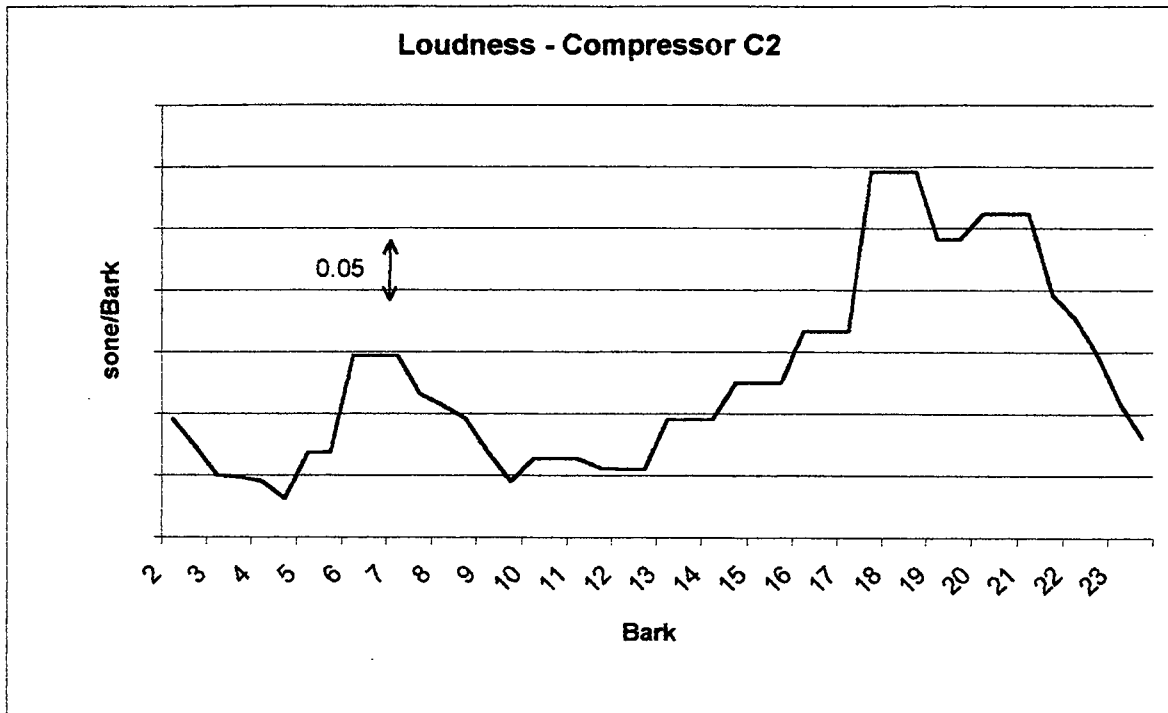


Figura 4.6 - “loudness” do compressor C2.

O compressor C3 apresenta valores de níveis de ruído e de “loudness” bastante elevados em comparação aos demais compressores, apresentado uma área na curva de “loudness” muito mais extensa. Pode-se observar que o aumento de nível entre as bandas de 2.500 Hz e 3.150 Hz (15 e 16 Bark, aproximadamente) é bem mais acentuada do que o incremento entre as bandas de 1.000 Hz e 1.250 Hz (9 e 10 Bark, aproximadamente). Apesar disto no gráfico de “loudness” ocorre um aumento muito mais considerável na região entre 15 e 16 Bark, mostrando a sensibilidade do “loudness” à variação do nível de ruído nesta região, no compressor C3. Veja as Figuras 4.7 e 4.8.

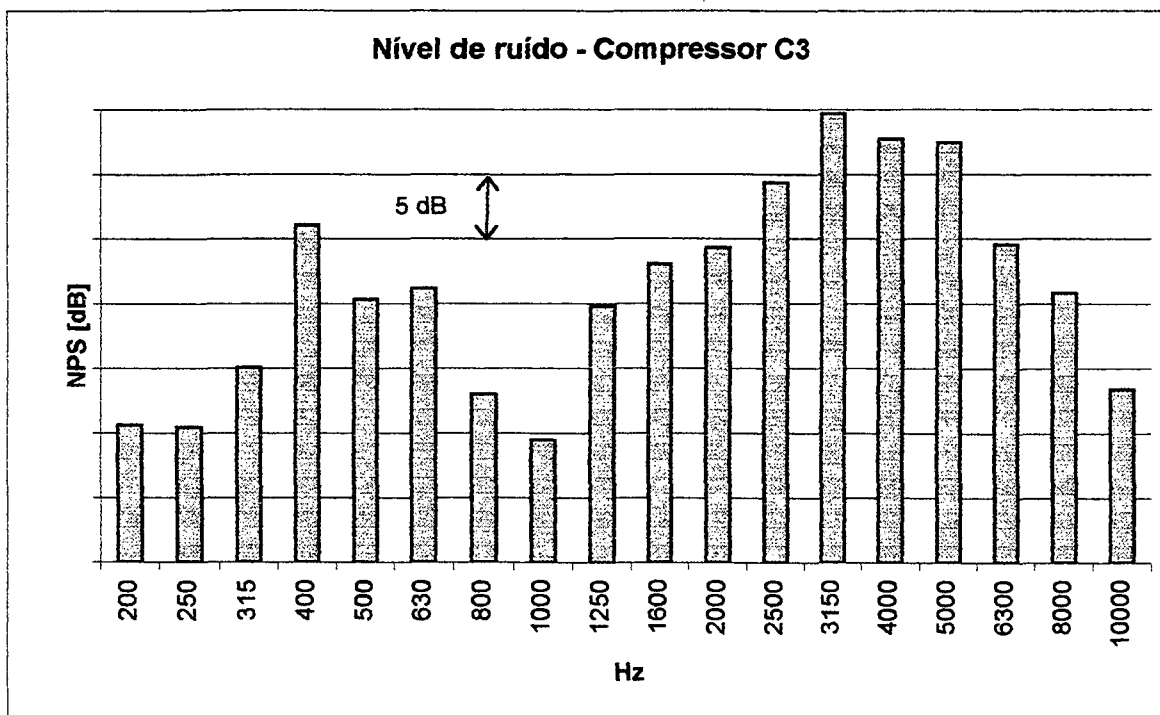


Figura 4.7 - Nível de pressão sonora (NPS) do compressor C3, em bandas de 1/3 de oitava.

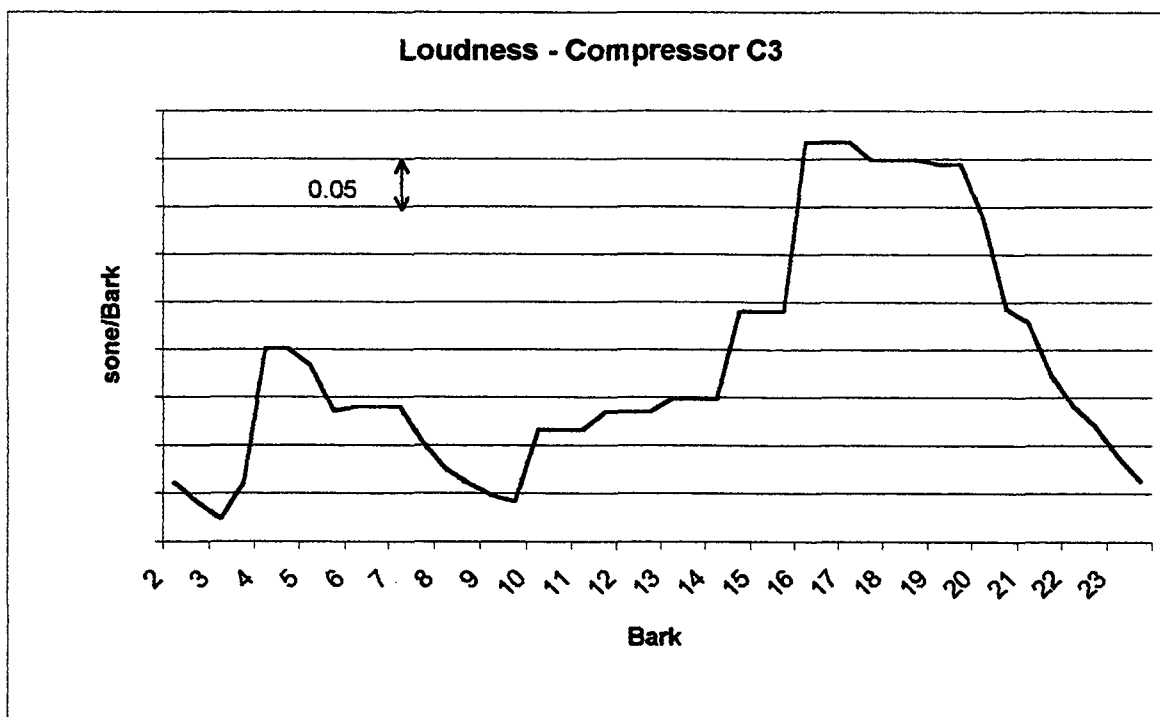


Figura 4.8 - "loudness" do compressor C3.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram o espectro de ruído e de “loudness” do compressor C4. Percebe-se pela observação do mesmo que a sua resposta do “loudness” é muito mais plana do que as demais, sendo mais semelhante a do compressor C1. O pequeno pico observado no espectro de ruído em 500 Hz (aproximadamente 5.5 Bark) provoca uma alteração muito pequena na resposta do “loudness”.

Esta menor área de influência das regiões com maiores níveis indicam, pela análise do “loudness”, que existe uma menor possibilidade de que alterações nestas regiões do espectro de ruído deste compressor resultarem no surgimento de outros picos de ruídos indesejados, que porventura poderiam estar sendo mascarados por estes de maior nível.

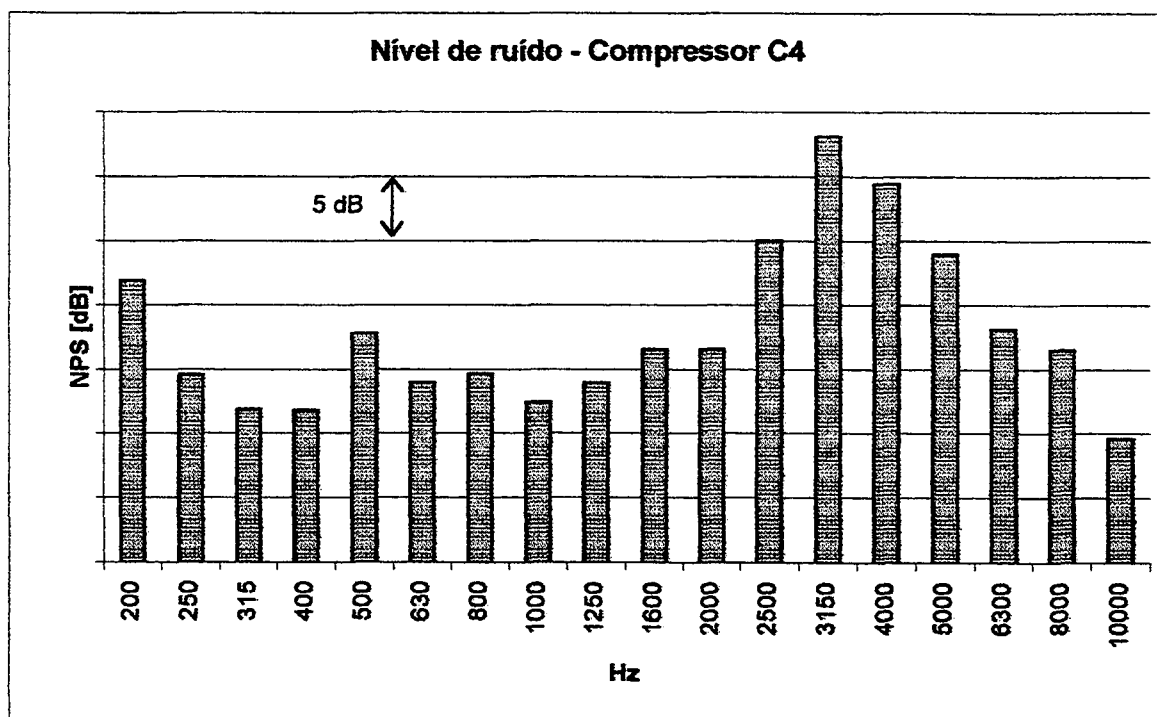


Figura 4.9 - Nível de pressão sonora (NPS) do compressor C4, em bandas de 1/3 de oitava.

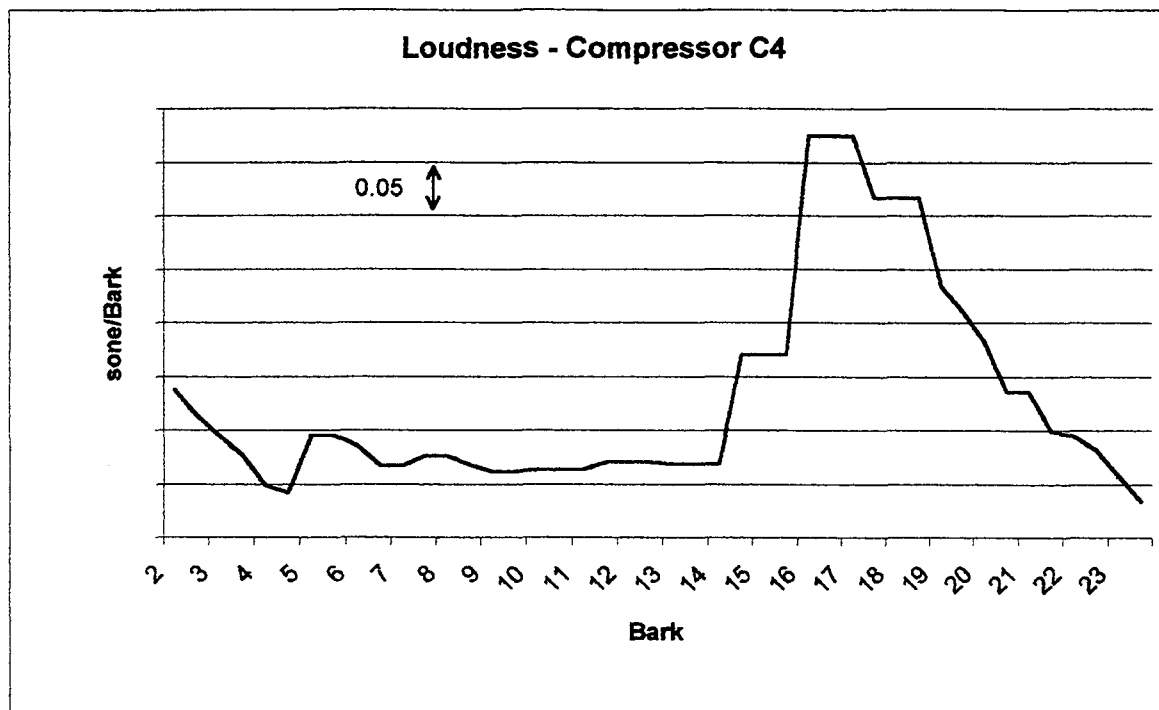


Figura 4.10 - "loudness" do compressor C4.

A partir destes sinais foi determinado o grupo de sinais do compressor para a análise digital, sendo estes apresentados numa ordem definida aleatoriamente, para que não se incorresse em tendências incluídas pelo avaliador. Foi solicitado aos jurados que apresentassem as suas preferências, sendo o resultado apresentado na Figura 4.11. Esta figura indica quanto menor o valor melhor a aceitação ao ruído do compressor. O modelo do questionário utilizado para a avaliação encontra-se no Anexo 02.

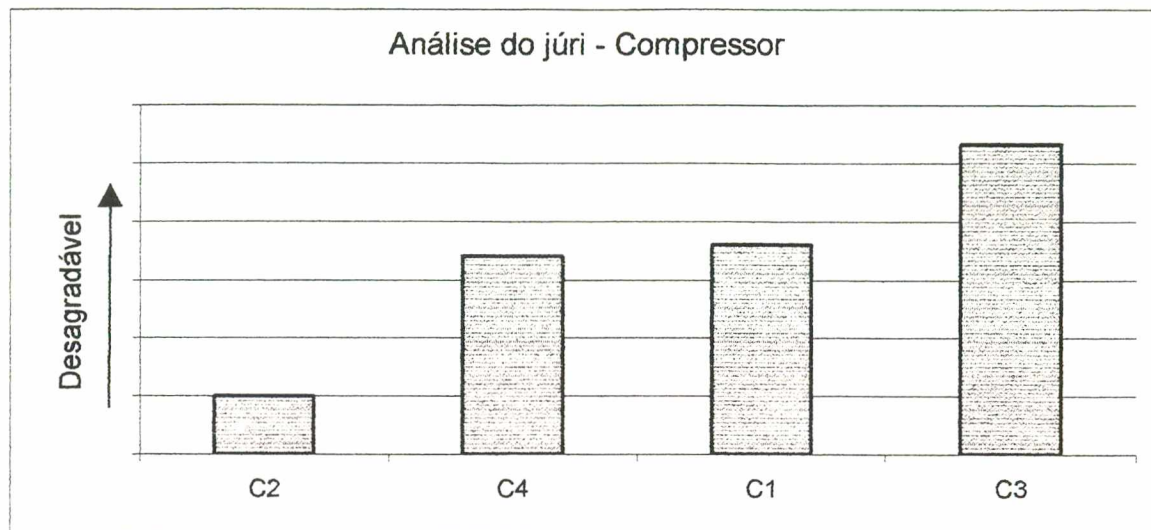


Figura 4.11 - Resposta do júri em relação aos ruídos dos compressores.

Segundo o júri, o compressor C2 apresentou ruído mais agradável, havendo uma grande diferença em relação aos demais, principalmente o ruído C3. As respostas das avaliações dos jurados, quando comparadas aos resultados das medições dos compressores, justificam as diferenças dos níveis de ruído e de “loudness” dos sinais. Os valores numéricos das métricas de psicoacústica dos compressores e suas comparações são apresentadas a seguir.

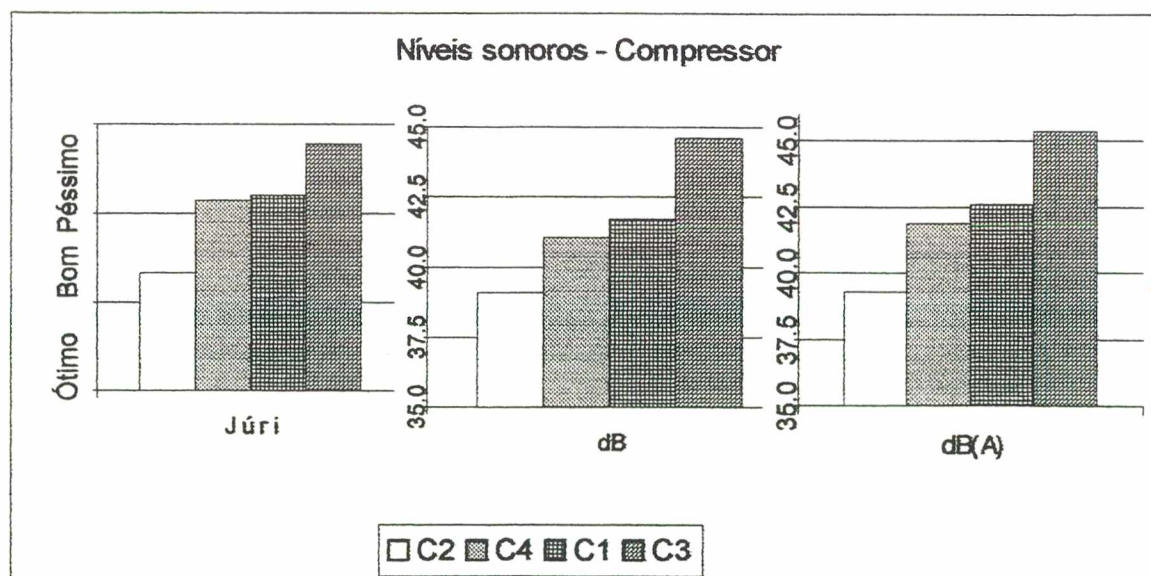


Figura 4.12 - Comparação entre a resposta do júri e os valores em dB e dB(A).

Na Figura 4.12 está mostrada a comparação da resposta do júri com os valores dos níveis globais em dB e dB(A), apresentando também uma correlação direta com as respostas do júri.

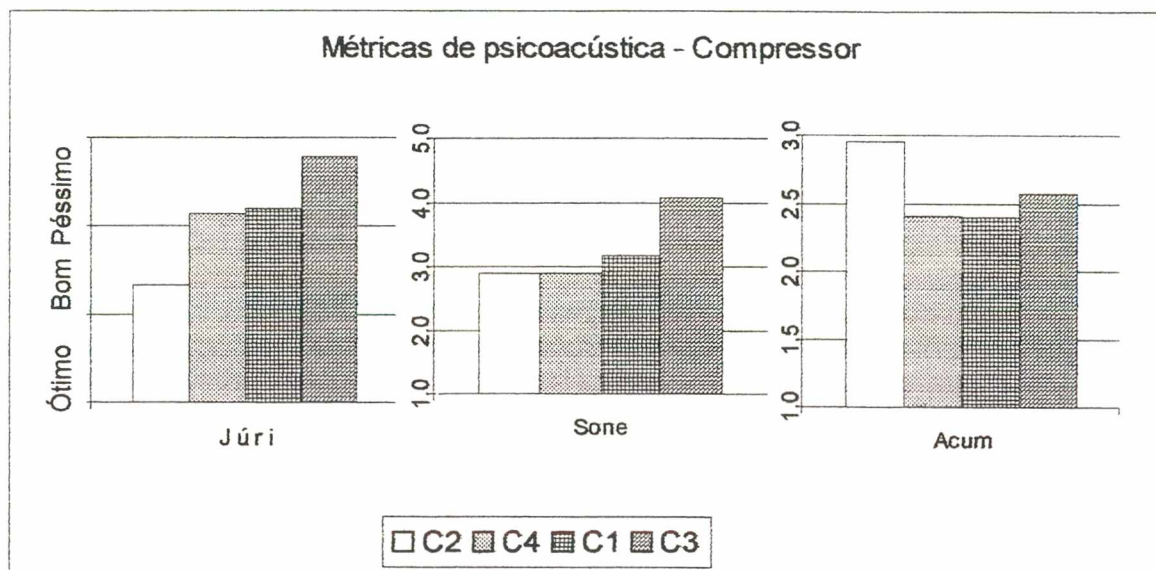


Figura 4.13 - Comparação entre as respostas do júri e os resultados do "loudness" e do "sharpness".

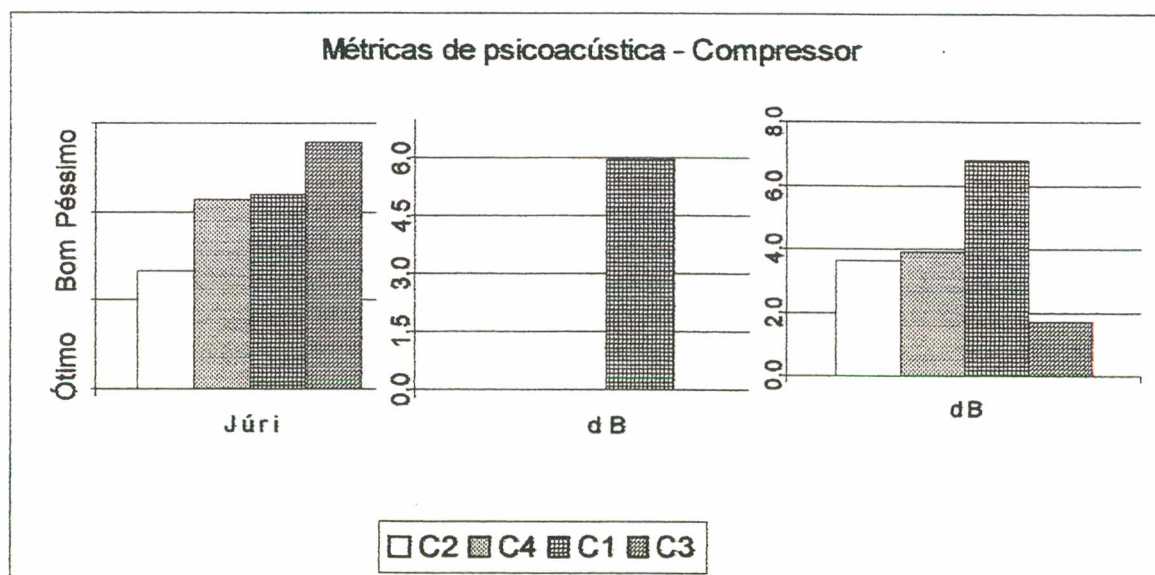


Figura 4.14 - Comparação entre a resposta do júri e as do "tone-to-noise ratio" (dB) e do "proeminence ratio" (dB).

Pela análise dos resultados mostrados nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 percebe-se que o “loudness” e o “fluctuation strength” apresentam uma relação semelhante à da resposta do júri, e as respostas do “sharpness” e do “roughness” apresentam uma relação inversa à da avaliação dos jurados. Os valores de “tone-to-noise ratio” e do “prominence ratio” que não apresentam nenhuma correlação que possa ser associada à avaliação do júri.

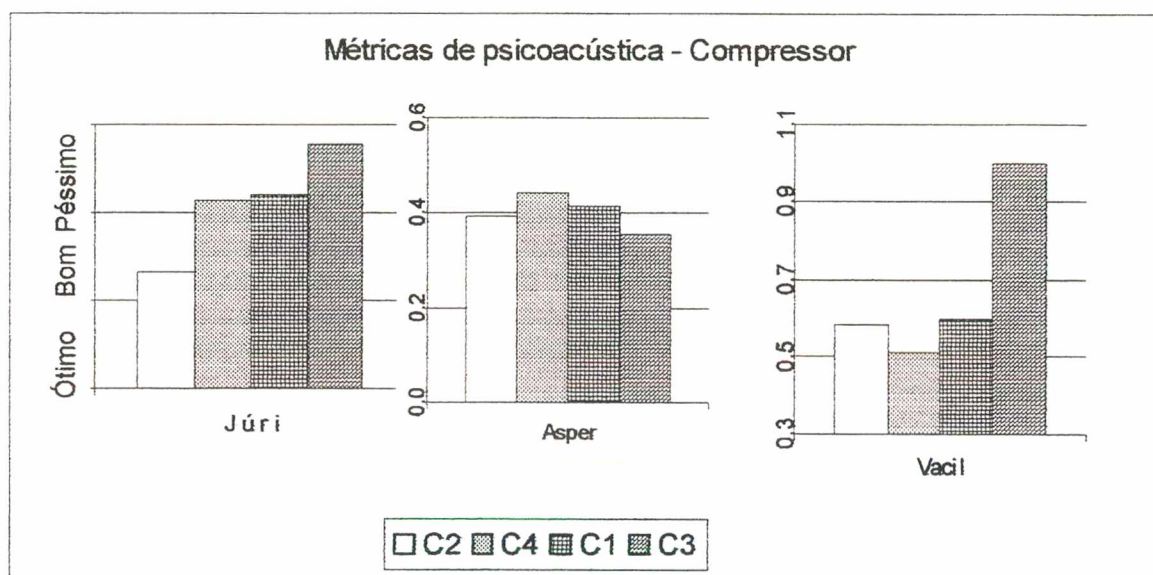


Figura 4.15 - Comparação entre a resposta do júri e as do “roughness” (asper) e “fluctuation strength” (vacil).

Mesmo podendo ser verificadas algumas relações entre as métricas ainda se faz necessária a realização de novas análises de júri para que estas possam ser confirmadas, já que as diferenças são muito pequenas em alguns casos.

A segunda etapa da análise foi a realização de alterações nos sinais de forma que o que obteve a indicação de mais desagradável pela avaliação do júri foi comparado com o de melhor avaliação e modificado de forma a apresentar as mesmas características e resultar na melhoria da sua avaliação por parte dos jurados.

A grande diferença entre as respostas dos dois compressores pode ser observada nas Figuras 4.16 e 4.17, sendo que a partir da observação dos espectros de ruído e do “loudness” foram definidas as regiões necessárias para alteração, realizadas através do software B&K PULSE SQ.

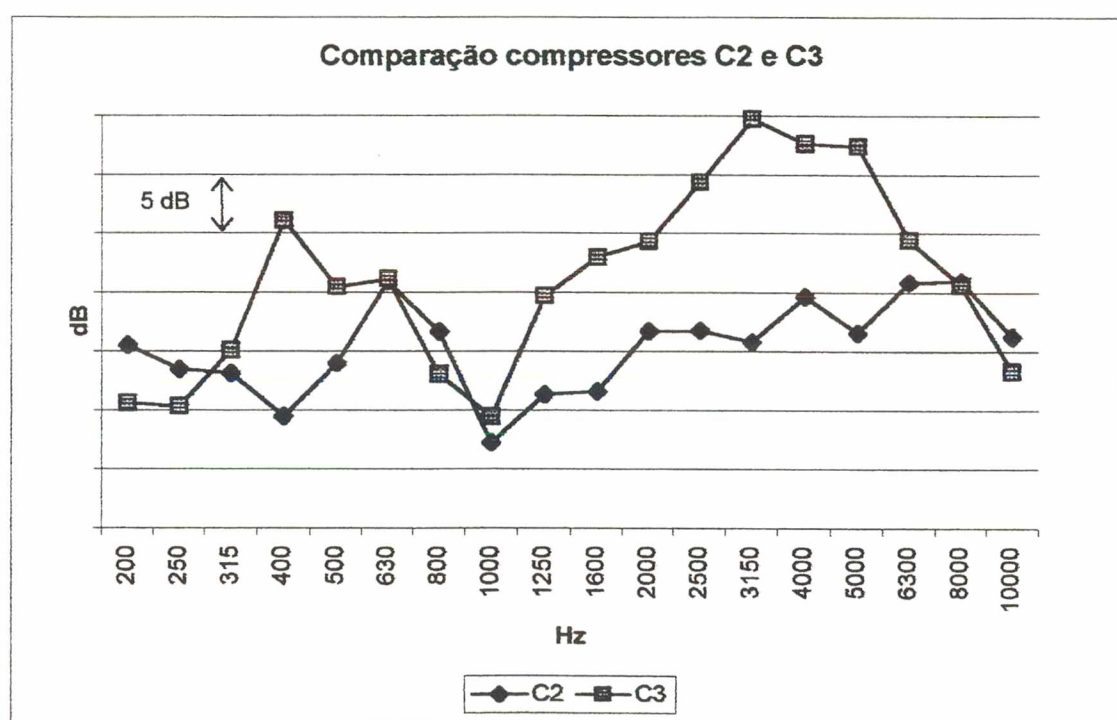


Figura 4.16 - Comparação entre os espectros de ruído dos compressores C2 e C3.

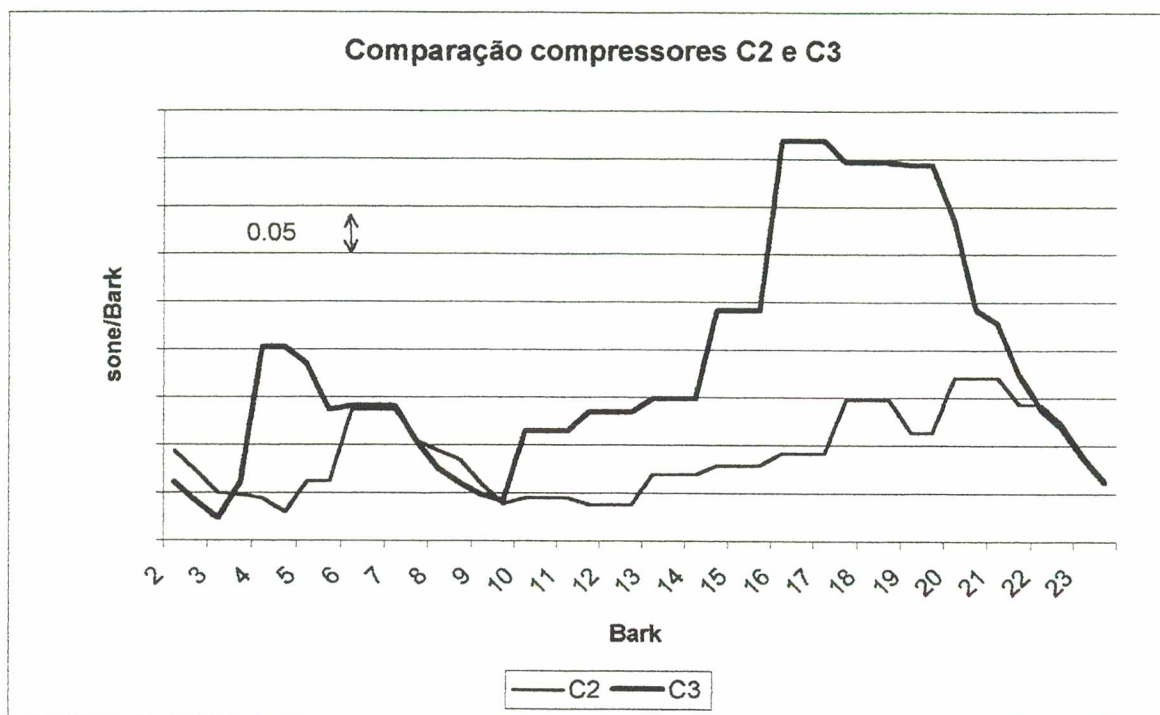


Figura 4.17 - Comparação entre os "loudness" dos compressores C2 e C3.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 estão mostrados os espectros de ruído do compressor C3 e do compressor C3 após a sua alteração digital, podendo ser observada a magnitude das alterações realizadas através do software B&K PULSE SQ com o objetivo de igualar-se a avaliação do compressor C3 com a do compressor C2.

A comparação entre o compressor C2 e o C3, com alteração digital, está nas Figuras 4.20 e 4.21, podendo-se observar a grande redução ocorrida nos valores espectrais do compressor C3 para que este pudesse ser comparado ao compressor C2.

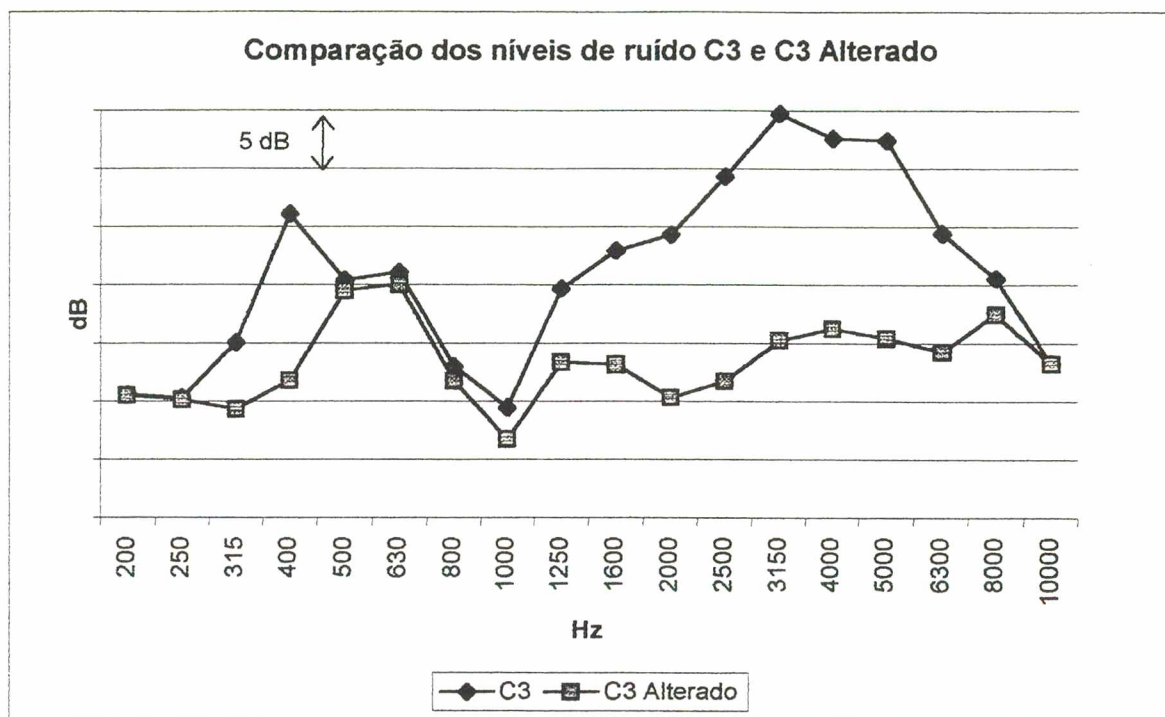


Figura 4.18 - Comparação entre os espectros de ruído dos sinais do compressor C3 e C3 Alterado.

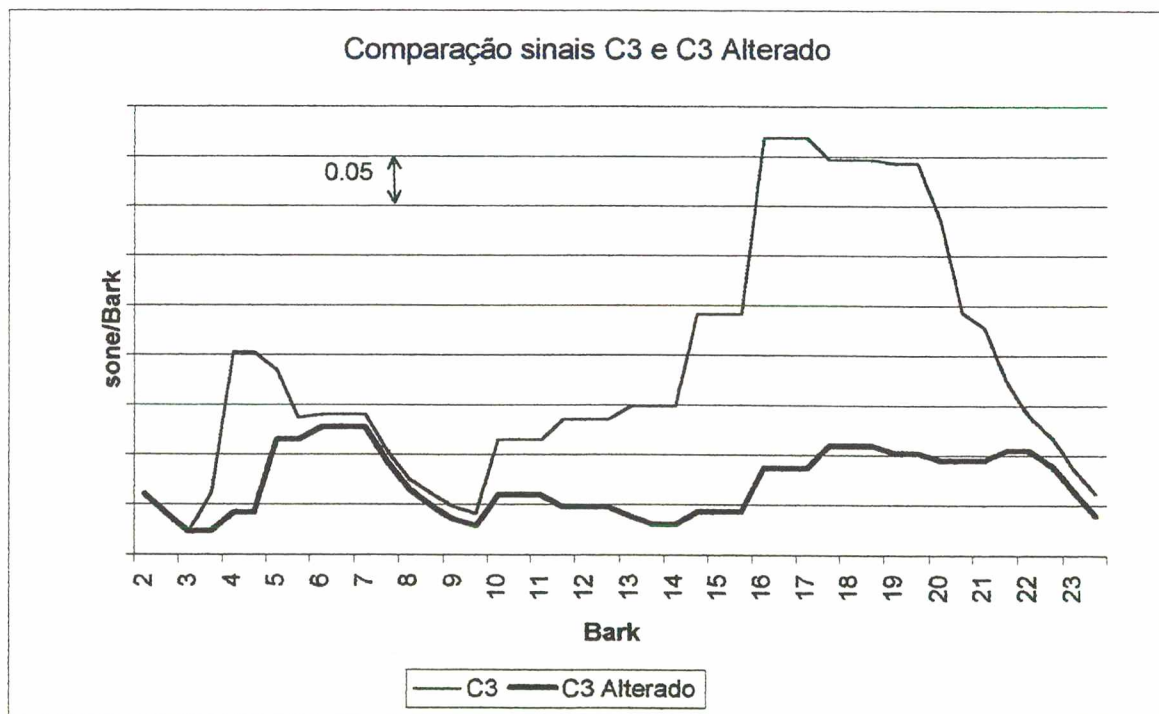


Figura 4.19 - Comparação entre os "loudness" do compressor C3 e C3 com alteração digital.

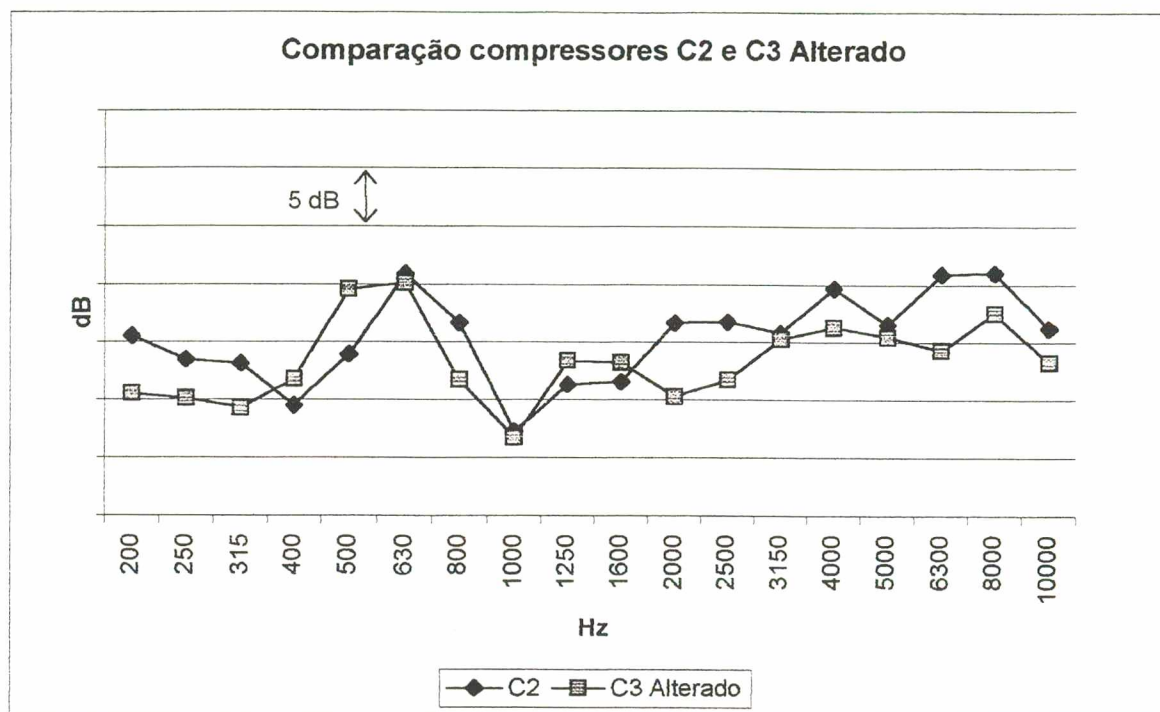


Figura 4.20 - Comparação entre os espectros de ruído dos compressores C2 e C3 com alteração digital.

As tendências dos sinais tornaram-se muito semelhantes, o que contribuiu para a alteração da avaliação dos jurados. Porém, alterações desta magnitude são de difícil obtenção na prática, pois se consideraram reduções maiores do que 15 dB em certas bandas. Esta alteração deve ser entendida apenas como exemplo para aplicação do método.

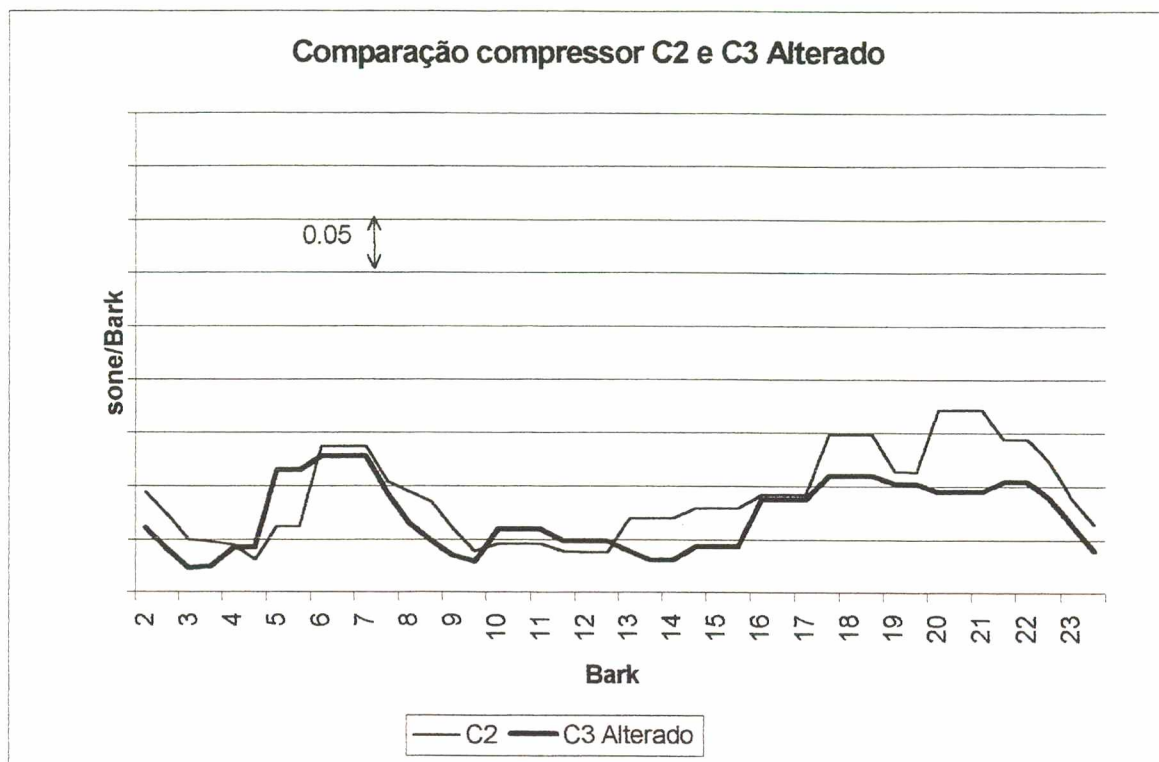


Figura 4.21 - Comparação entre os “loudness” do compressor C2 e C3 com alteração digital.

Assim, realizou-se uma nova análise de júri, onde o sinal do compressor C3 foi substituído pelo sinal do compressor C3 alterado digitalmente, sendo formado um novo grupo de ruídos, ordenados aleatoriamente da mesma forma que anteriormente.

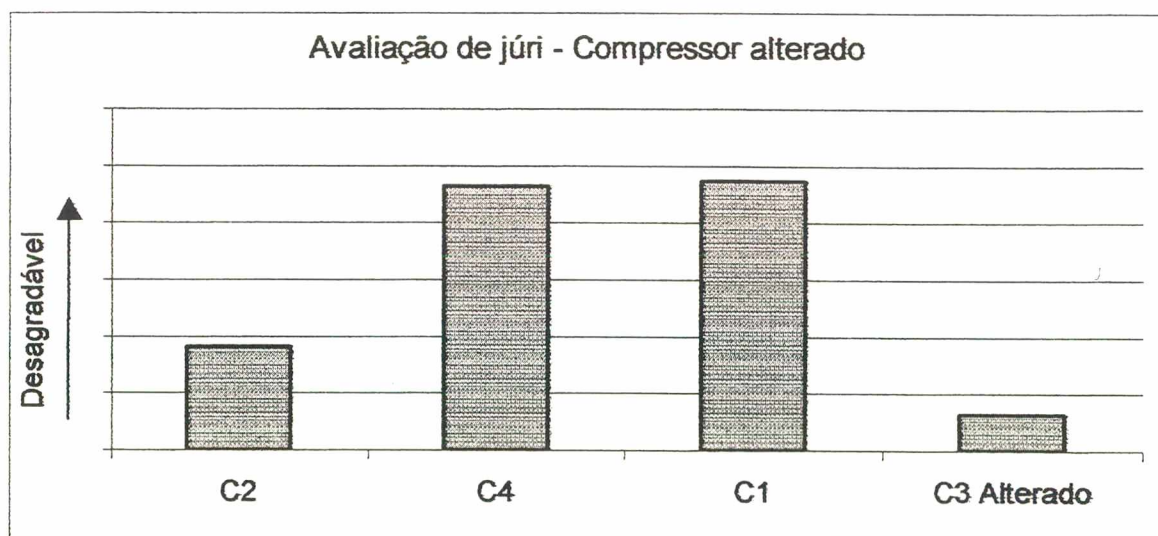


Figura 4.22 - Resultado da avaliação de júri utilizando o sinal do compressor C3 com alteração digital.

A Figura 4.22 apresenta o resultado da avaliação de júri considerando o sinal do compressor C3 alterado. Pode-se perceber a grande diferença na avaliação dos jurados causada pela alteração, havendo um aumento da resposta em termos de “desagradabilidade” dos compressores C1, C2 e C4, pois como houve uma nova referência para o melhor sinal, o C3 alterado, os demais sinais acabaram por parecerem piores do que na avaliação anterior.

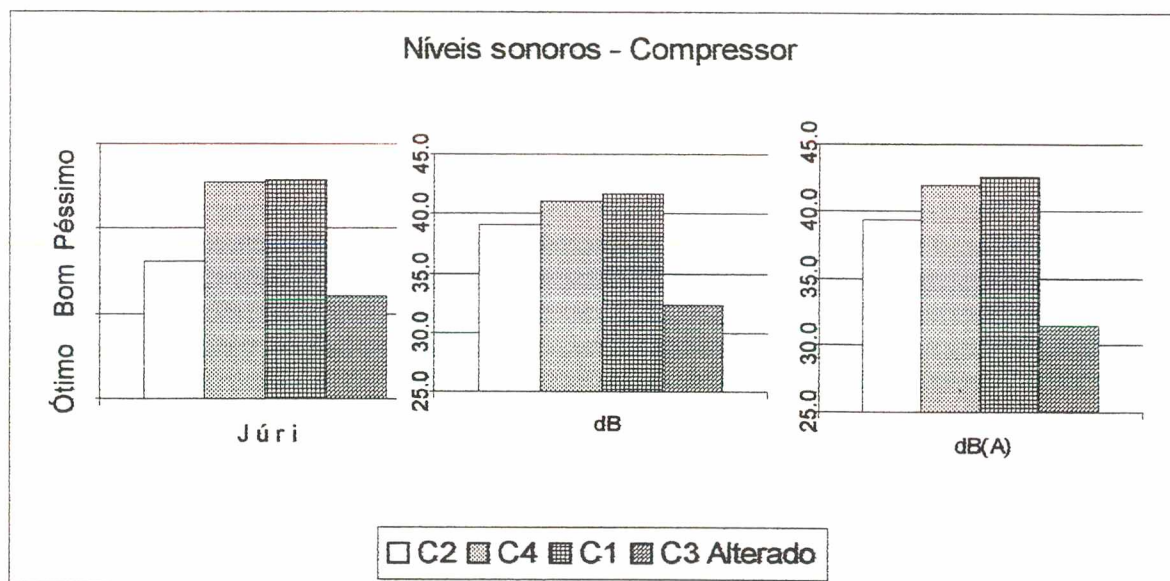


Figura 4.23 - Comparação da avaliação do júri com as respostas em dB e em dB(A).

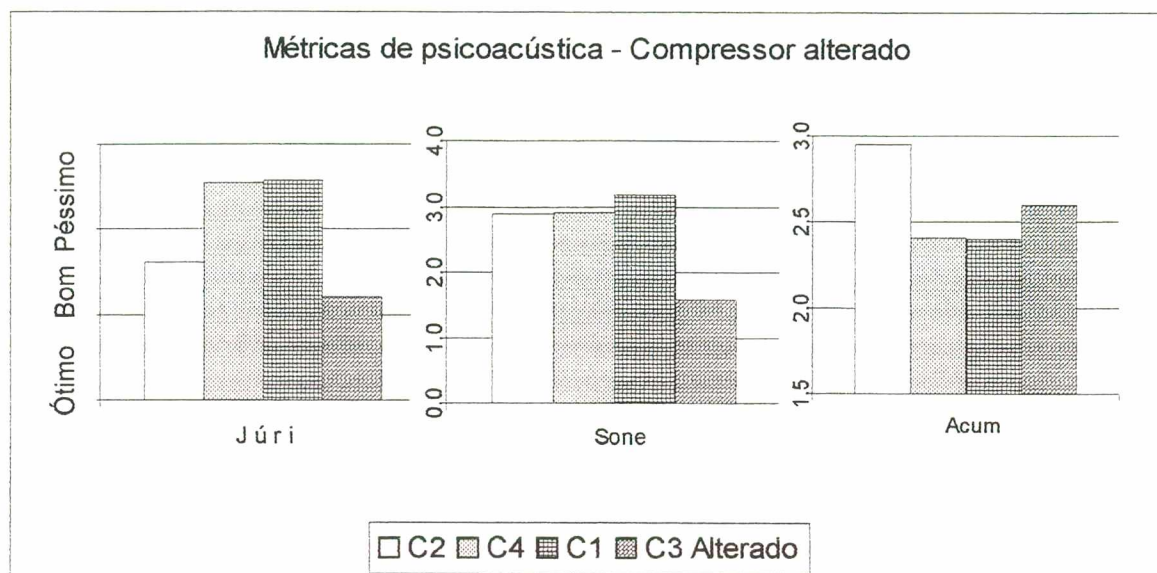


Figura 4.24 - Comparação da avaliação do júri com as métricas do “loudness” e do “sharpness”.

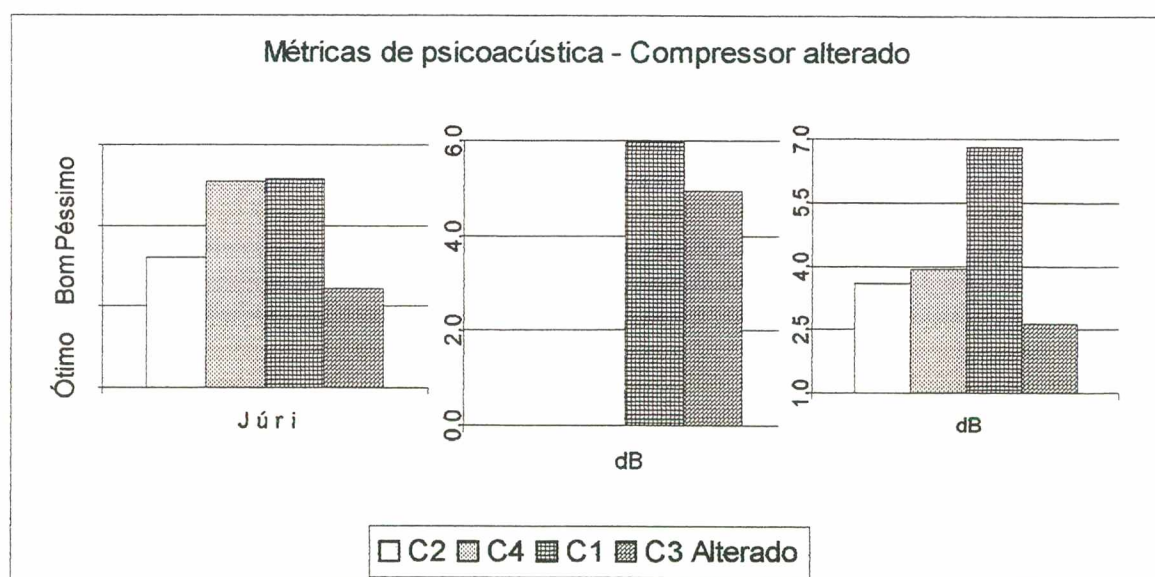


Figura 4.25 - Comparação da avaliação do júri com as métricas do “tone-to-noise ratio” e “prominence ratio”.

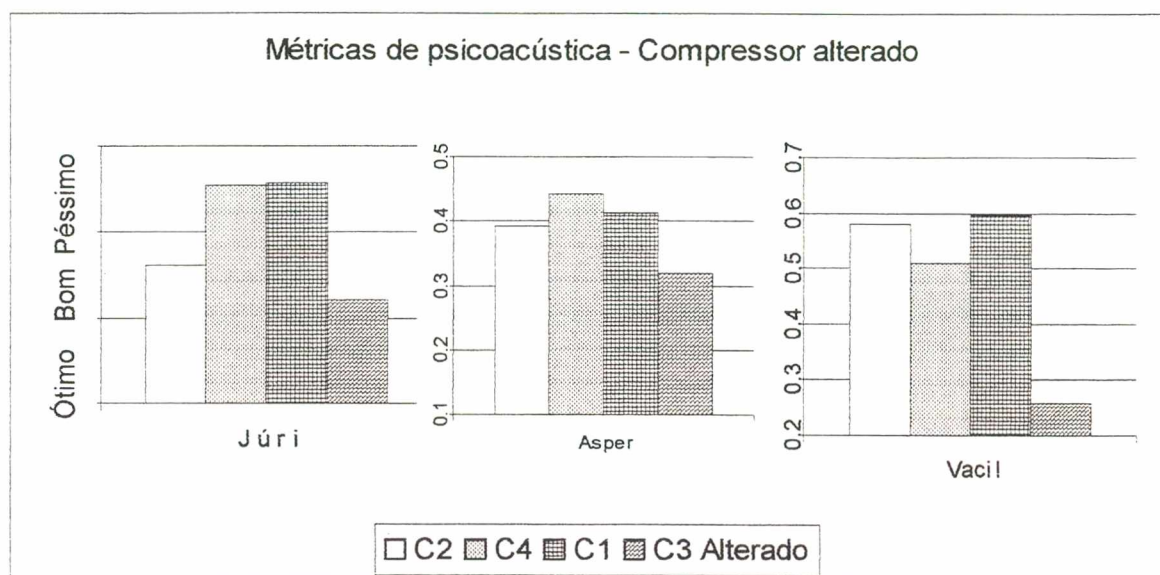


Figura 4.26 - Comparação da avaliação do júri com as métricas “roughness” e “fluctuation strength”.

As tendências das avaliações do júri com as métricas mantiveram-se as mesmas, não havendo grandes alterações nas tendências, podendo-se chamar atenção ao “sharpness”, que praticamente não alterou o seu valor e à métrica de tom puro do “tone-to-noise ratio”, que acabou por ser evidenciada pelo fato de que antes da alteração a grande área que foi reduzida (facilmente observada na resposta do “loudness”) deveria estar mascarando tons que agora se evidenciam no seu conjunto.

As relações inversas que ocorriam com as métricas do “sharpness” e do “roughness” acabaram por não se confirmar, confirmando que as relações, nestes casos pelo menos, realmente são frágeis, não podendo ser adotadas como regras para futuras avaliações e fontes de predição das avaliações de júri.

4.2 Avaliação dos sistemas de refrigeração

4.2.1 RESULTADOS DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E "LOUDNESS"

As avaliações dos sistemas de refrigeração foram realizadas utilizando quatro sistemas de mesma marca e modelo, sendo o compressor original de um deles retirado e utilizado nas análises dos compressores. Foi mantido um sistema de refrigeração com o compressor original, que foi escolhido como representativo da média das medições de ruído dos quatro sistemas de refrigeração. Nos demais sistemas foram instalados os compressores selecionados e utilizados na análise anterior.

Os sistemas de refrigeração foram codificados seguindo a mesma seqüência da codificação dos compressores, sendo que o dígito numérico corresponde ao do compressor montado no sistema de refrigeração, sendo eles denominados por S1, S2, S3 e S4.

A análise dos sistemas de refrigeração realizou-se em duas etapas, uma apresentação direta aos jurados e outra através da apresentação digital via fones de ouvido dos sinais gravados na sala de avaliação subjetiva. No sistemas de refrigeração os sinais foram medidos em três instantes momentos: na partida, no funcionamento e na parada. Entretanto serão apresentados apenas os resultados referentes ao funcionamento devido à inconstância dos sinais de partida e parada, já que tanto na partida quanto na parada do compressor ocorrem grandes transientes, sendo que estes não podem ser controlados de forma adequada.

Assim a análise do ruídos da partida e da parada dos compressores instalados nos sistemas de refrigeração com poucas amostras, como neste caso, está sujeita a uma grande variabilidade, o que prejudica as análises de júri e as suas comparações.

Os espectros de ruído e do “loudness” dos sistemas de refrigeração durante o funcionamento estão apresentadas a seguir.

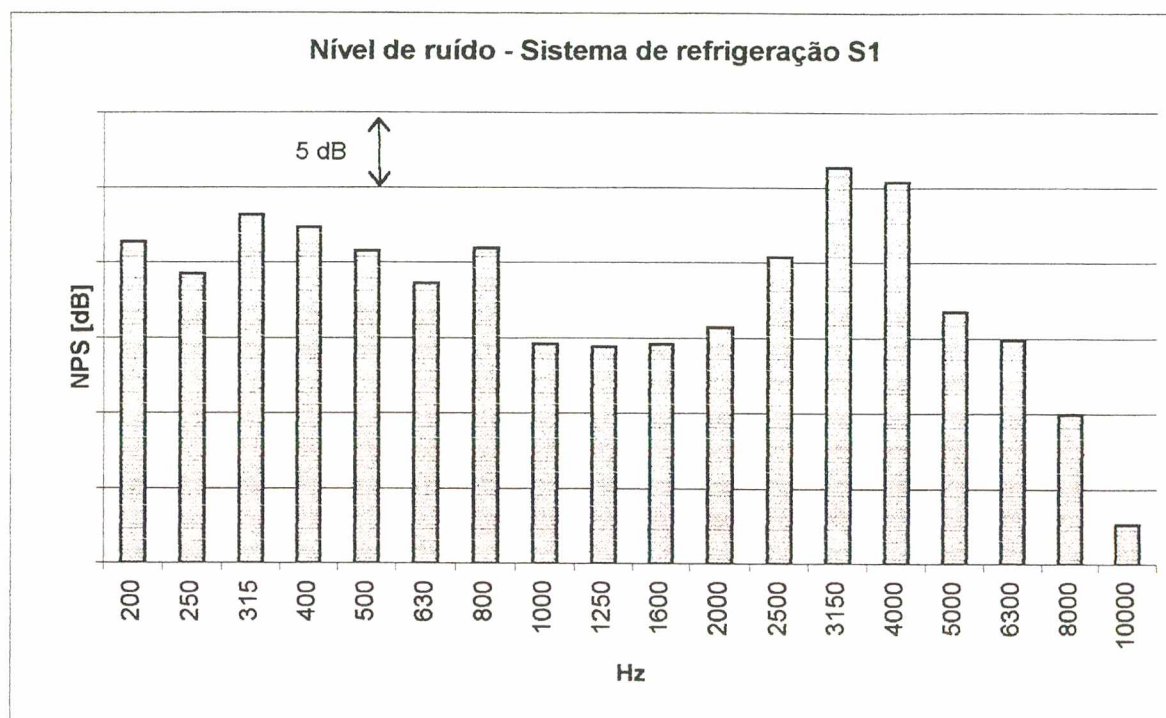


Figura 4.27 - Nível de pressão sonora (NPS) do sistema de refrigeração S1, em bandas de 1/3 de oitava.

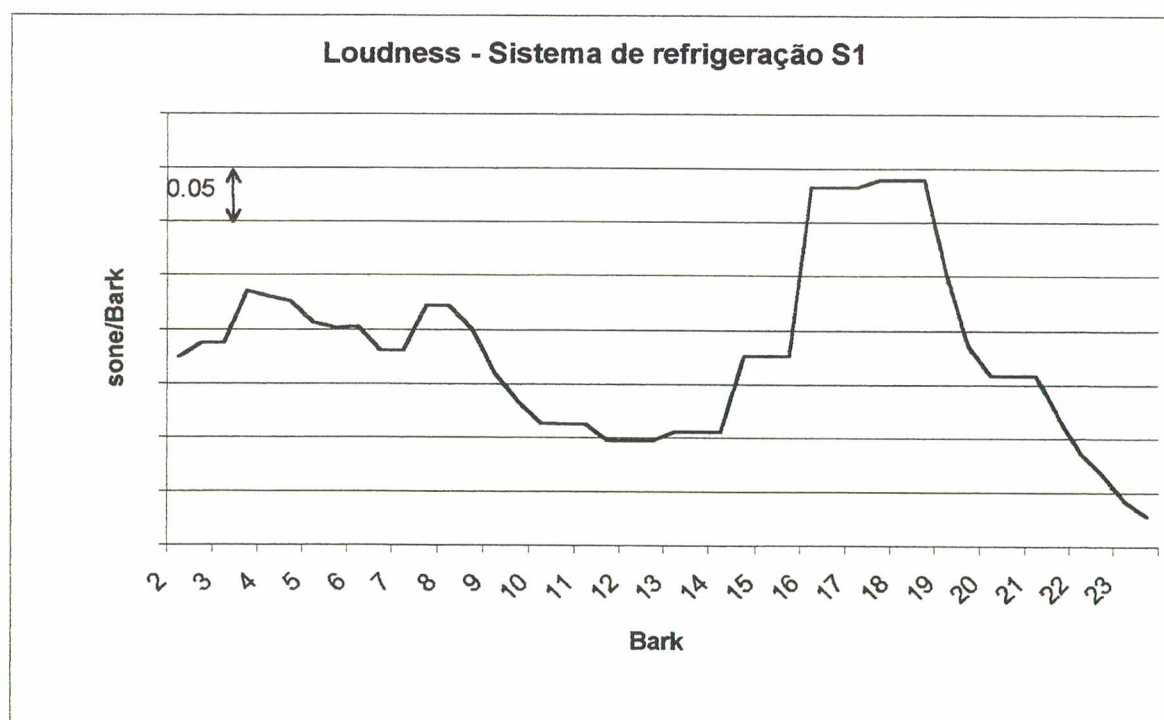


Figura 4.28 - “loudness” do sistema de refrigeração S1.

Nas Figuras 4.27 e 4.28 estão representadas as respostas dos sistema de refrigeração S1, onde percebe-se uma distribuição mais homogênea do sinal do que nos compressores, mantendo-se ainda uma região de destaque com nível elevado na região das bandas de 3.150 Hz e 4.000 Hz (de 16,5 Bark a 19,5 Bark).

Nas Figuras 4.29 e 4.30 estão as respostas do sistema de refrigeração S2, que apresenta uma distribuição do sinal diferente das demais, onde há um destaque na região de baixas frequências (315 Hz a 500 Hz, 3,5 Bark a 5 Bark), ocorrendo ainda a elevação na região de altas frequências, não sendo esta porém a região dominante no sinal.

A característica do sinal em baixas frequências acaba por influir nos valores do “sharpness”, pois como a sua característica principal é a de avaliar as componentes de alta frequência dos sinais, a variação das componentes de baixa frequência acaba influenciando estes valores exatamente por toná-los menos destacados no espectro total do sinal.

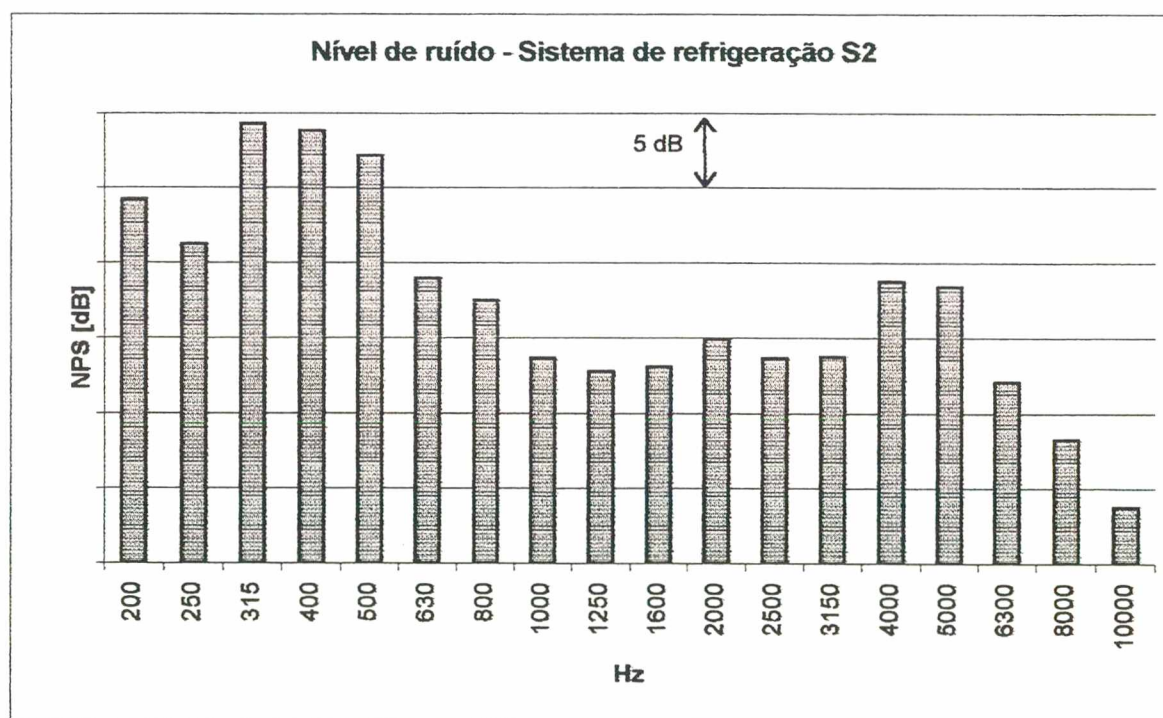


Figura 4.29 - Nível de pressão sonora (NPS) do sistema de refrigeração S2, em bandas de 1/3 de oitava.

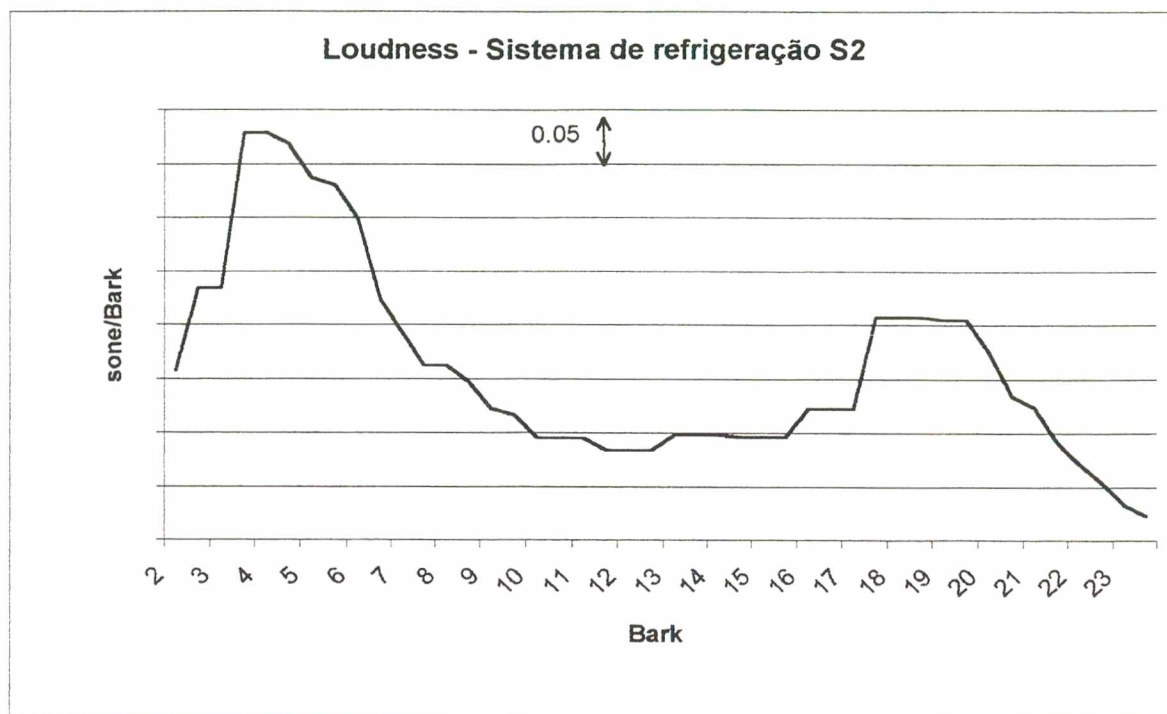


Figura 4.30 - "loudness" do sistema de refrigeração S2.

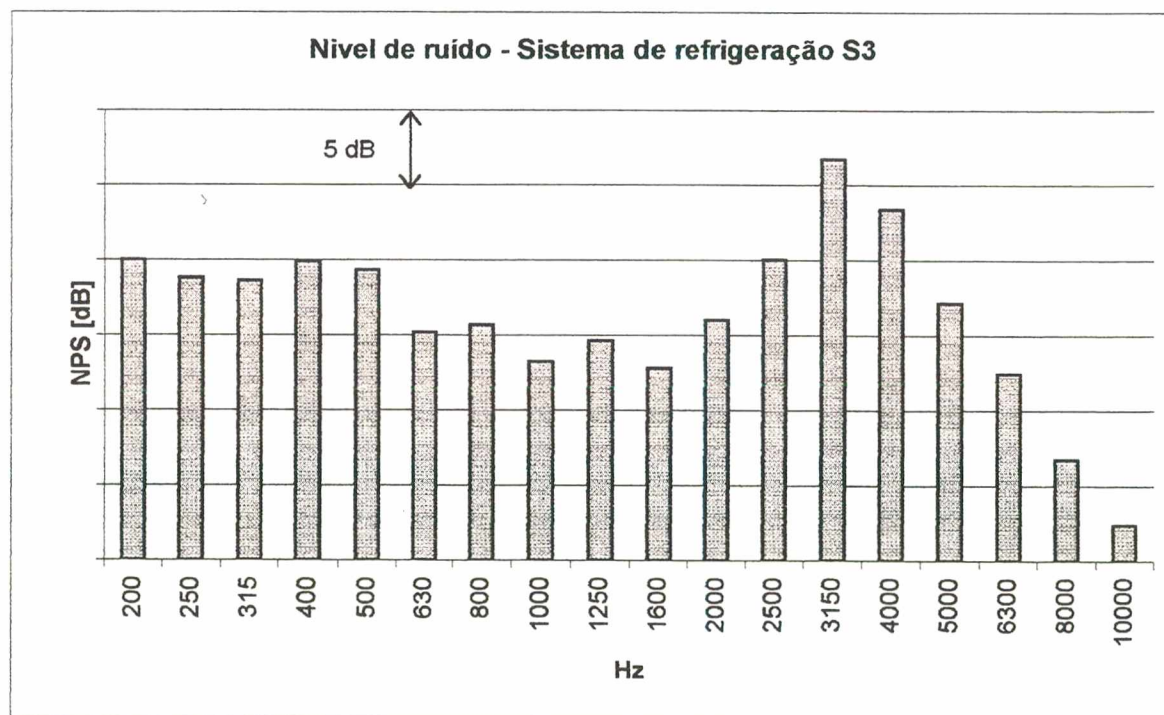


Figura 4.31 - Nível de pressão sonora (NPS) do sistema de refrigeração S3, em bandas de 1/3 de oitava.

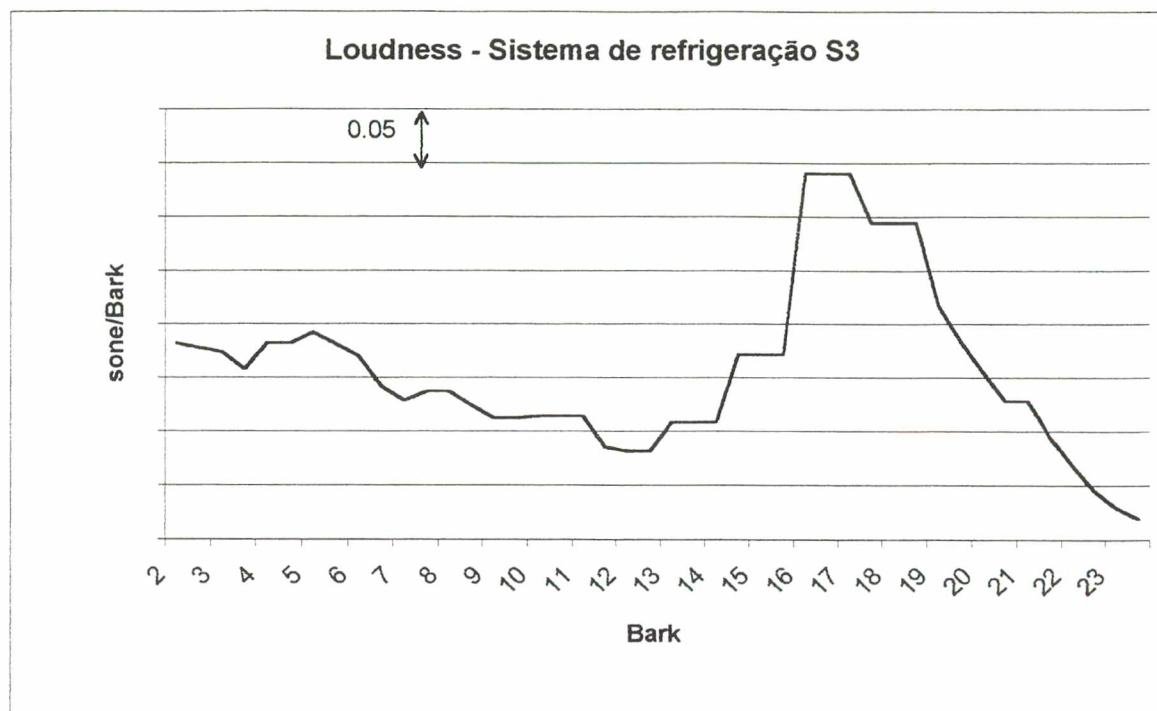


Figura 4.32 - "loudness" do sistema de refrigeração S3.

Nas Figuras 4.31 e 4.32 estão mostrados os espectros de ruído e o de "loudness" do sistema de refrigeração S3, sendo este semelhante ao do sistema de refrigeração S1. São observadas regiões de destaque na faixa de altas frequências. A faixa de destaque no espectro de ruído na região de baixas frequências, que também pode ser observada, não apresenta porém um destaque correspondente no espectro de "loudness".

O espectro de ruído e do "loudness" do sistema de refrigeração S4 estão mostrados nas Figuras 4.33 e 4.34 respectivamente. Embora apresente um destaque na região de baixas frequências no espectro de ruído este não é refletido no "loudness", que acaba ampliando a resposta na região das bandas entre 2.500 Hz e 4.000 Hz (entre 15 Bark e 19 Bark), podendo ocorrer aqui também um efeito de atenuação do valor do "sharpness", em função da equidade entre as componentes de baixa e alta frequências.

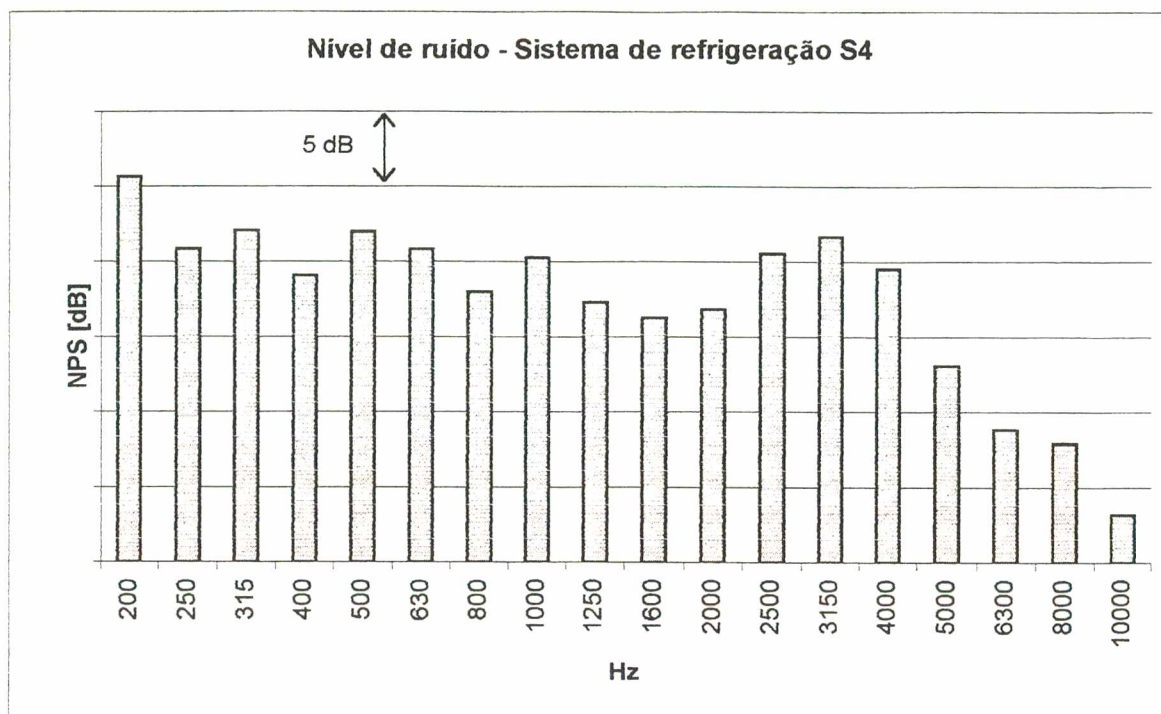


Figura 4.33 - Nível de pressão sonora (NPS) do sistema de refrigeração S4, em bandas de 1/3 de oitava.

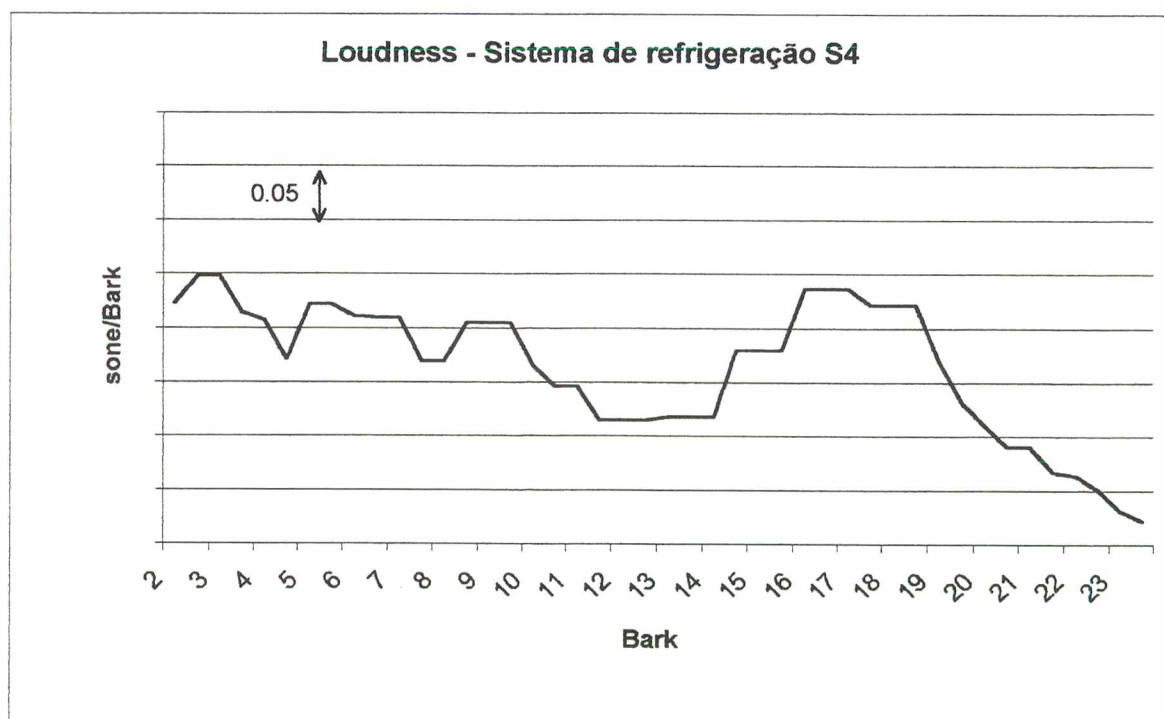


Figura 4.34 - "loudness" do sistema de refrigeração S4.

4.2.2 RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DE JÚRI

Os sistemas de refrigeração foram colocados na sala de análise subjetiva, lado a lado, para que se pudesse realizar a primeira etapa da avaliação, com apresentação do ruído diretamente dos sistemas de refrigeração aos jurados, sendo denominada apresentação direta. Os resultados estão mostrados na Figura 4.35.

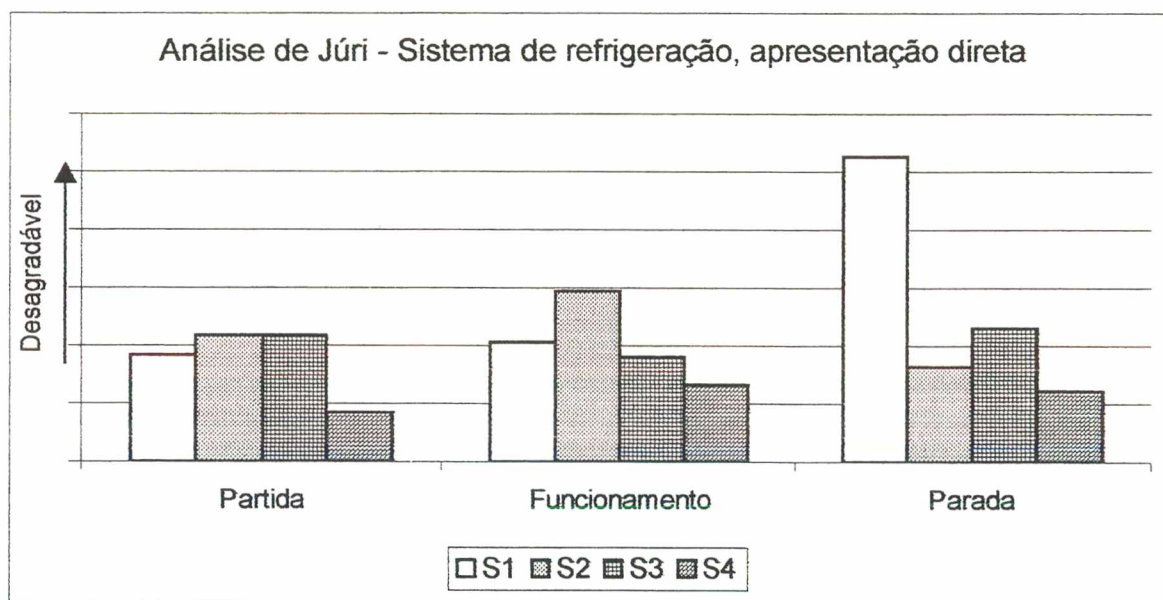


Figura 4.35 - Avaliação do júri com sistema real nos três instantes da análise.

Como pode-se observar os sistemas de refrigeração S1 e S2 apresentam as maiores diferenças entre as avaliações subjetivas nos três momentos, sendo que os sistemas de refrigeração S3 e S4 apresentam respostas mais homogêneas. Porém, estas análises dos jurados não foram totalmente livre de influências, pois após o desligamento do sistema de refrigeração anterior, ruídos residuais do funcionamento do mesmo acabaram por influenciar nas avaliações seguintes, conforme indicações dos jurados.

Uma forma de eliminar esta interferência é a repetição da apresentação, o que se torna inviável neste caso devido ao número de fontes, pois estenderia demasiadamente o tempo de análise, tornando a tarefa do júri cansativa, prejudicando a qualidade da análise.

Os sinais de partida e parada não foram utilizados na comparação entre os resultados dos júri direto e digital, pois não foi possível a gravação dos mesmo quando da apresentação direta. E, desta forma, devido à sua estrutura transiente não podemos garantir a equivalência dos sinais.

Após a apresentação direta realizou-se uma avaliação com a apresentação digital dos sinais, sendo estes separados em grupos de acordo com suas características, partida, funcionamento e parada, sendo eles selecionados aleatoriamente em cada grupo, para evitar que o julgamento do primeiro grupo acabe influenciando as avaliações dos demais, já que para alguns jurados a tendência lógica possa ser de que a avaliação seja equivalente em todos os trechos.

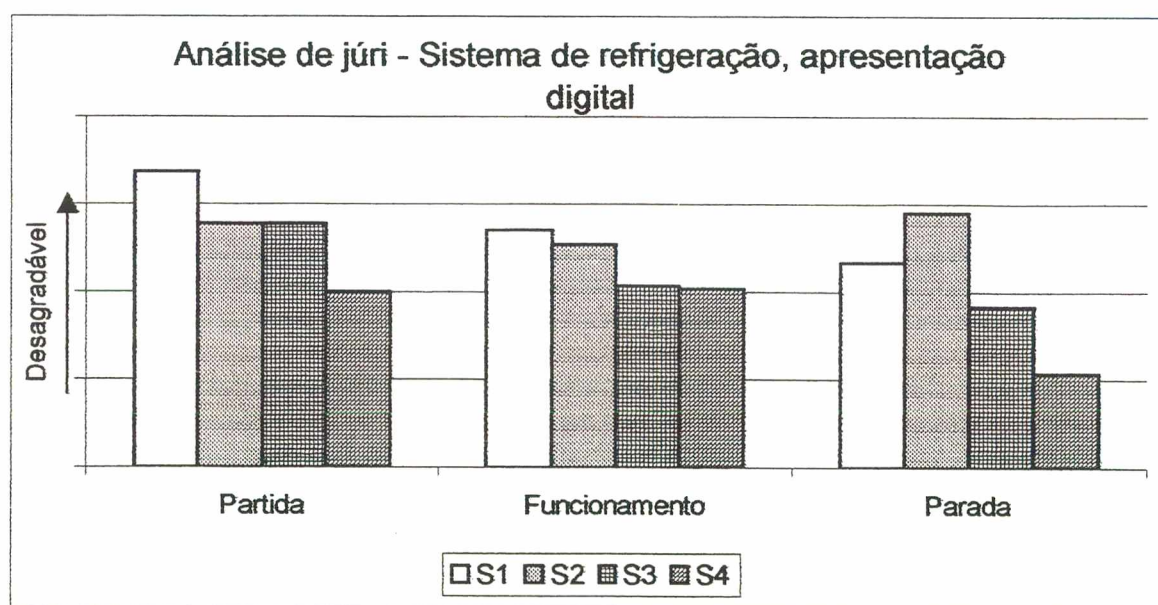


Figura 4.36 - Avaliação do júri com sistema digital nos três momentos de análise.

Os resultados apresentados na Figura 4.36 são mais confiáveis pois, além dos sinais terem sido agrupados em função das suas características, houve a possibilidade de repetição dos sinais, aumentando a capacidade de avaliação dos jurados. Pode-se perceber que a tendência da avaliação dos jurados em relação aos sinais foi semelhante, tendo como única diferença a avaliação da parada do sistema de refrigeração S2.

Embora exista uma tendência nos sinais de partida e parada nos compressores dos sistemas de refrigeração, como já citado não se pode considerar estas respostas totalmente confiáveis em função da impossibilidade da regularidade dos ruídos gerados.

Assim, considerando apenas a avaliação do funcionamento dos sistemas de refrigeração, nas figuras a seguir são apresentados os resultados das métricas de qualidade sonora.

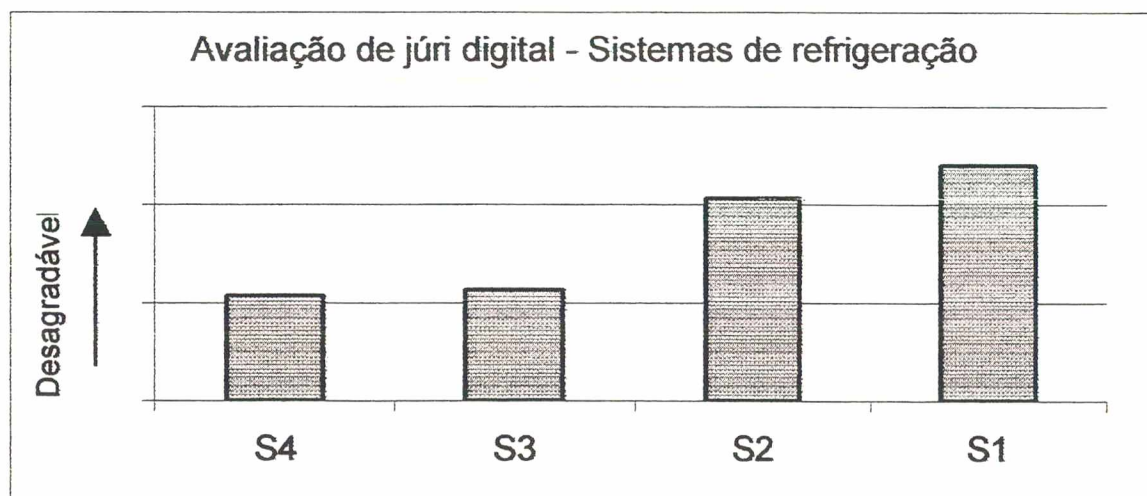


Figura 4.37 - Avaliação de júri digital do funcionamento do sistema.

A diferença entre os sistemas S3 e S4 são muito pequenas para que se possa afirmar que um foi melhor avaliado do que o outro, assim, considerando que o sistema S4 apresenta ruídos não relacionados ao compressor que mascaram a resposta do mesmo, e

conseqüentemente, acabam por melhorar a avaliação do mesmo, irá se considerar que o sistema de refrigeração S3 é o melhor avaliado e o S1 o pior avaliado.

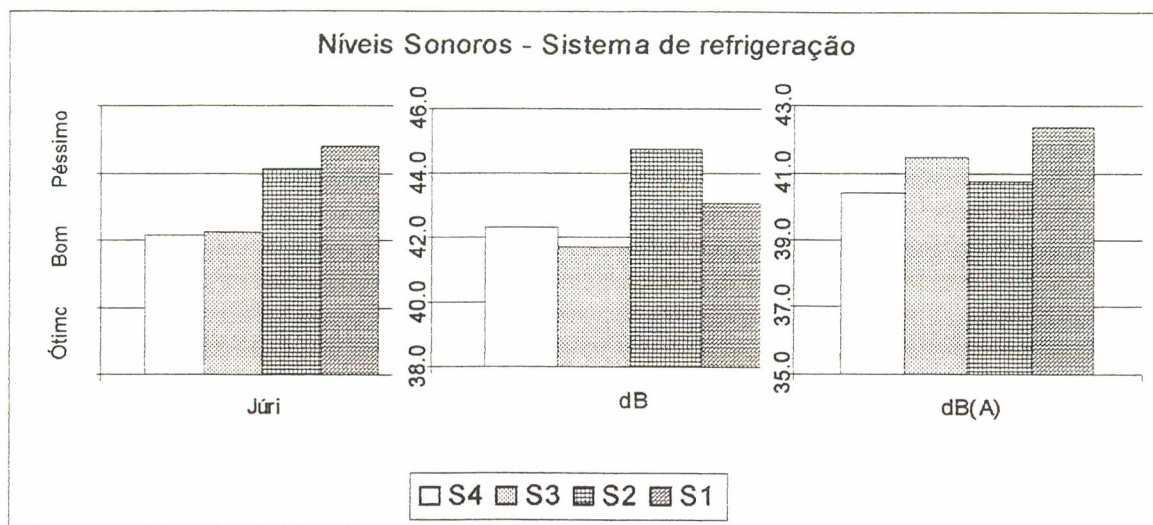


Figura 4.38 - Comparação da avaliação do júri com os níveis em dB e dB(A).

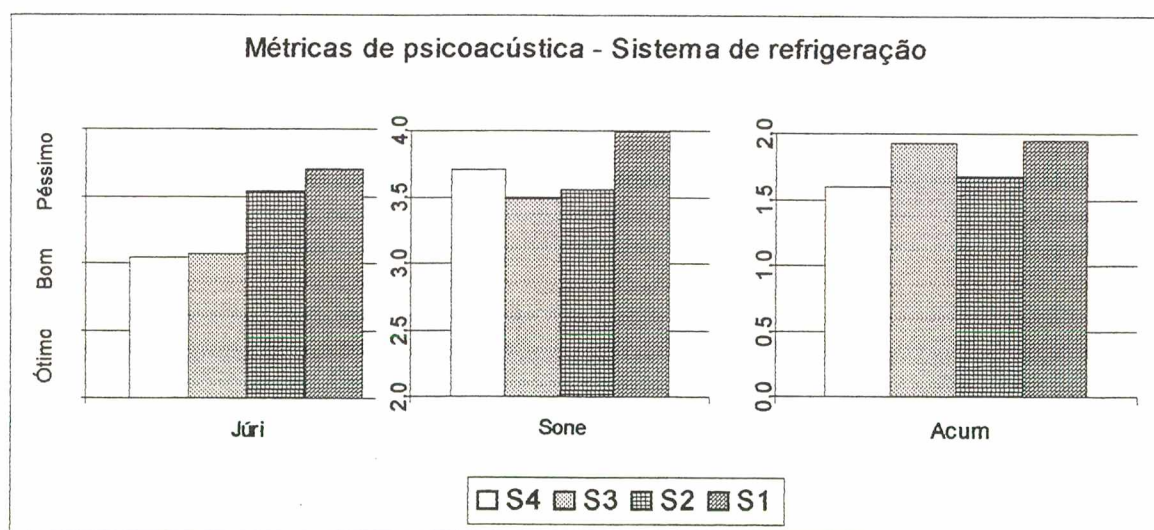


Figura 4.39 - Comparação da avaliação do júri com o "loudness" e com o "sharpness".

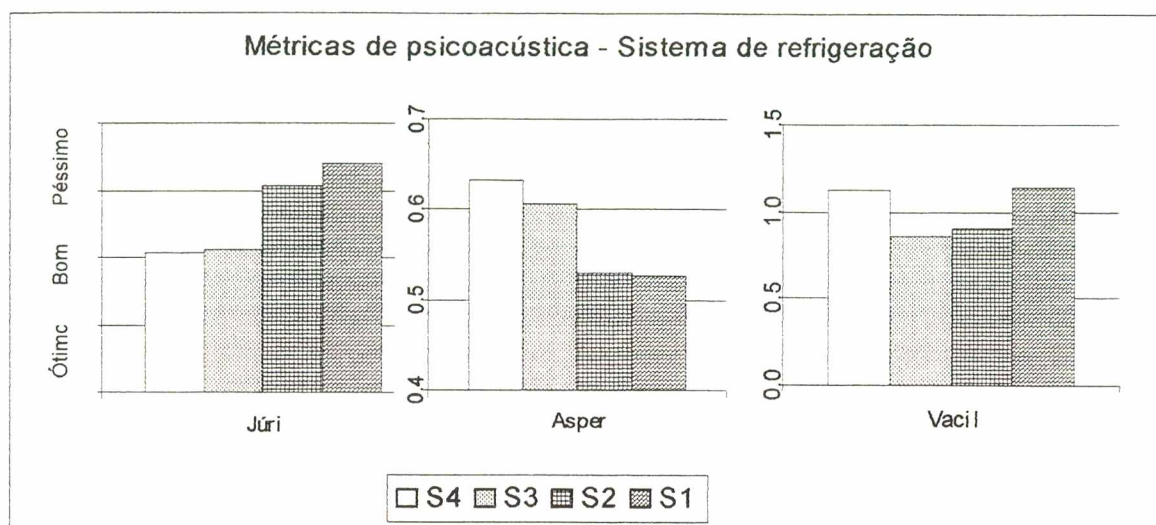


Figura 4.40 - Comparação da avaliação do júri com o “*roughness*” e com o “*fluctuation strength*”.

Há uma tendência de correlação da avaliação dos jurados com os níveis em dB e dB(A), mas sendo esta muito fraca não podendo ser considerada como uma forma de predição para novas análises, Figura 4.38. A correlação entre as avaliações dos jurados e as métricas pode ser considerada como direta no caso do “*loudness*”, mas não ocorrendo com o “*sharpness*”, em função das componentes de baixa frequência. Há também uma correlação no caso do “*roughness*”, o que não ocorre no caso do “*fluctuation strength*”.

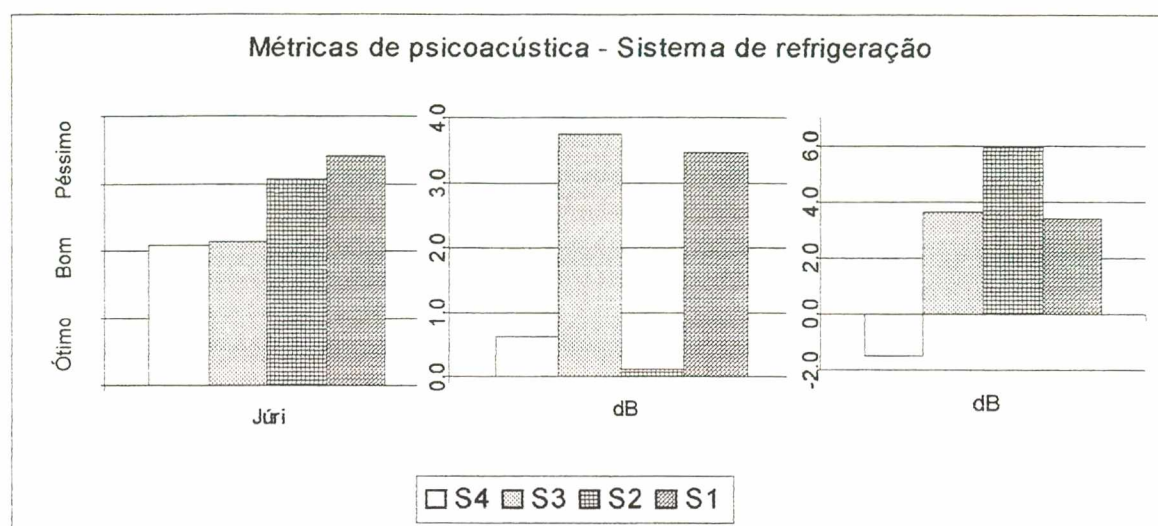


Figura 4.41 - Comparação da avaliação do júri com o “*tone-to-noise ratio*” e com o “*prominence ratio*”.

As métricas de tom puro apresentam valores que apontam a ocorrência de picos destacados nos sinais, indicando a possibilidade de ocorrência da percepção de tons puros nos sinais, o que pode não ocorrer devido à inexperiência dos jurados em relação à avaliação de ruídos.

A comparação entre avaliação dos jurados com a apresentação via fones de ouvido, digital, e a avaliação dos jurados com a apresentação direta aos sistemas de refrigeração, considerando apenas o funcionamento, está mostrada na Figura 4.42. Pode-se perceber que a avaliação apresenta uma única distorção na avaliação, o sistema de refrigeração S2, sendo que a tendência manteve-se nos demais, sendo este um fator de confirmação da fidelidade da reprodução.

As respostas das avaliações com a apresentação via fones de ouvido acabou apresentando valores maiores, em consequência da facilidade da identificação de cada momento da apresentação e da possibilidade da repetição dos sinais, o que facilita para os

jurados a identificação das nuances para melhores descrições das impressões de incomodidade dos sinais.

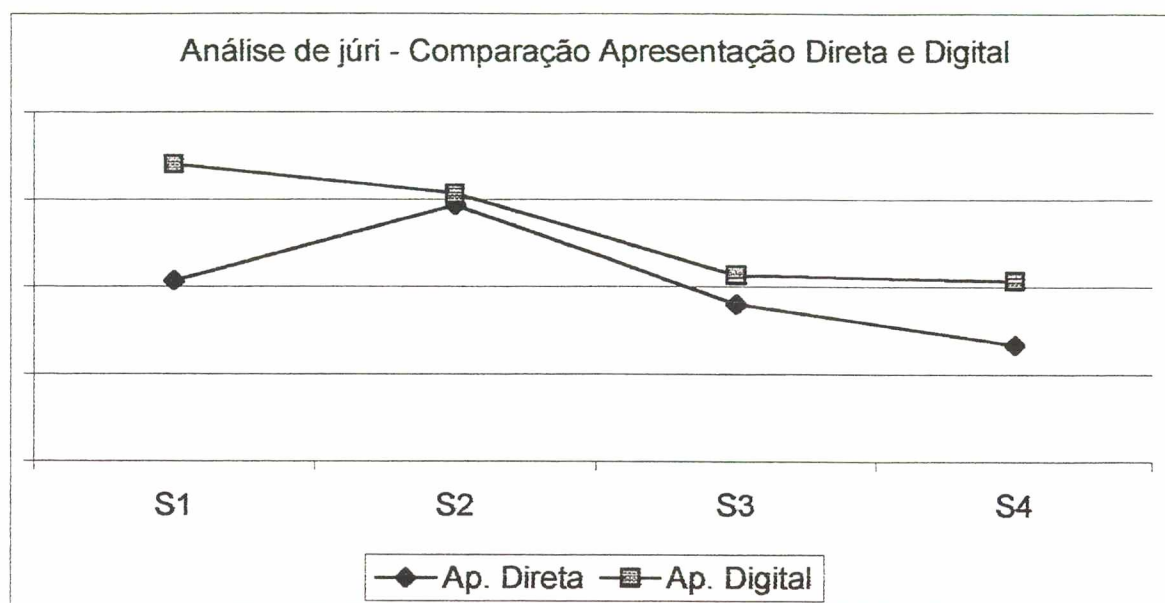


Figura 4.42 - Comparação da avaliação dos jurados dos sistemas de refrigeração no funcionamento na apresentação direta e na apresentação digital, via fones de ouvido.

Em seguida foram realizadas digitalmente alterações no sinal do sistema de refrigeração S1, sendo a comparação realizada com o sinal do sistema de refrigeração S3, pois em função da ocorrência do mascaramento gerado pelo ruído não relacionado ao compressor no sistema de refrigeração S4, considerado o melhor pelo júri, dificultar a comparação com o sinal S1, para a edição do mesmo, foi selecionado o sinal do sistema de refrigeração S3 como referência para alteração.

Nas Figuras 4.43 e 4.44 pode-se observar que as diferenças entre os espectros dos sinais é muito pequena quando comparadas com as diferenças encontradas entre sinais dos compressores, porém esta pequena diferença na distribuição foi o fator que determinou a diferença de avaliação por parte dos jurados, que mostrou-se bem acentuada. A partir daí

foram definidas as regiões para a alteração digital do sinal do sistema de refrigeração S1, sendo apresentados os resultados desta alteração nas figuras a seguir.

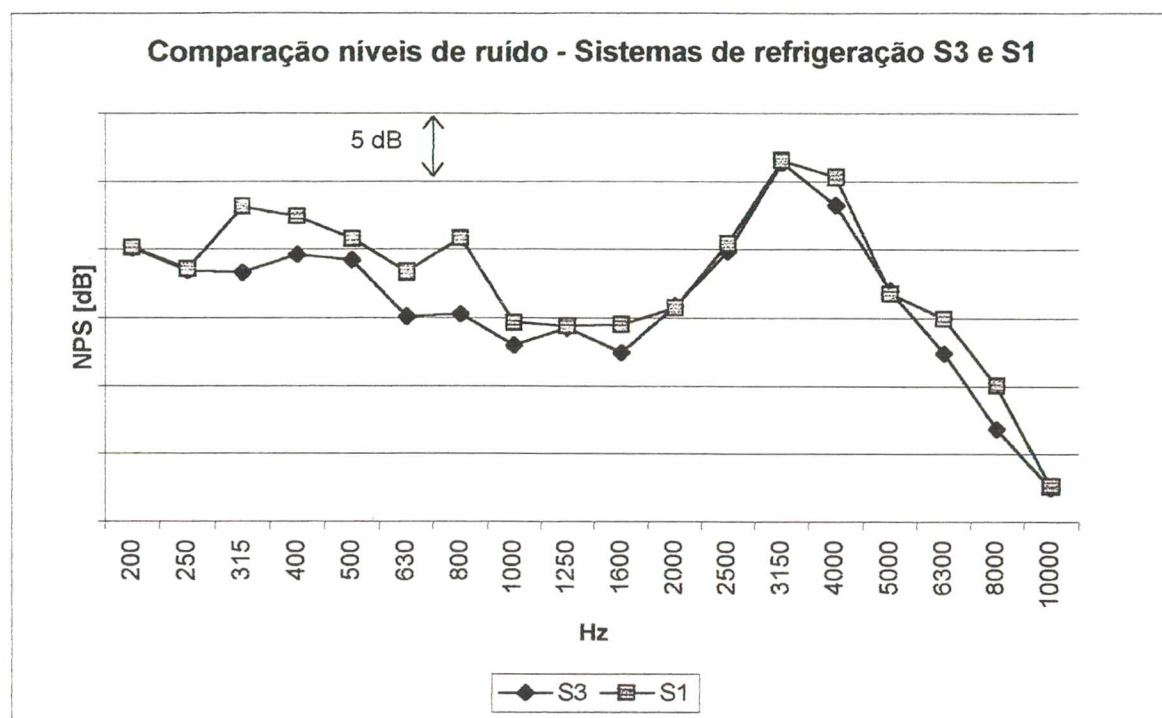


Figura 4.43 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) dos sistemas de refrigeração S3 e S1.

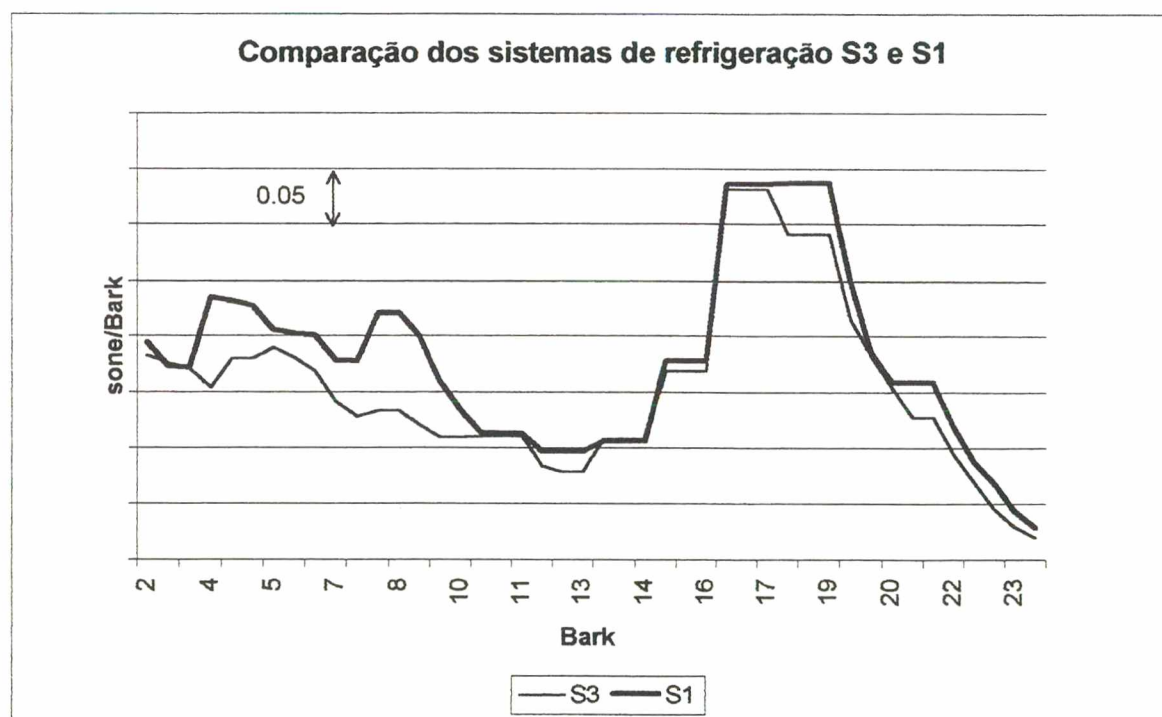


Figura 4.44 - Comparação do "loudness" dos sistemas de refrigeração S3 e S1.

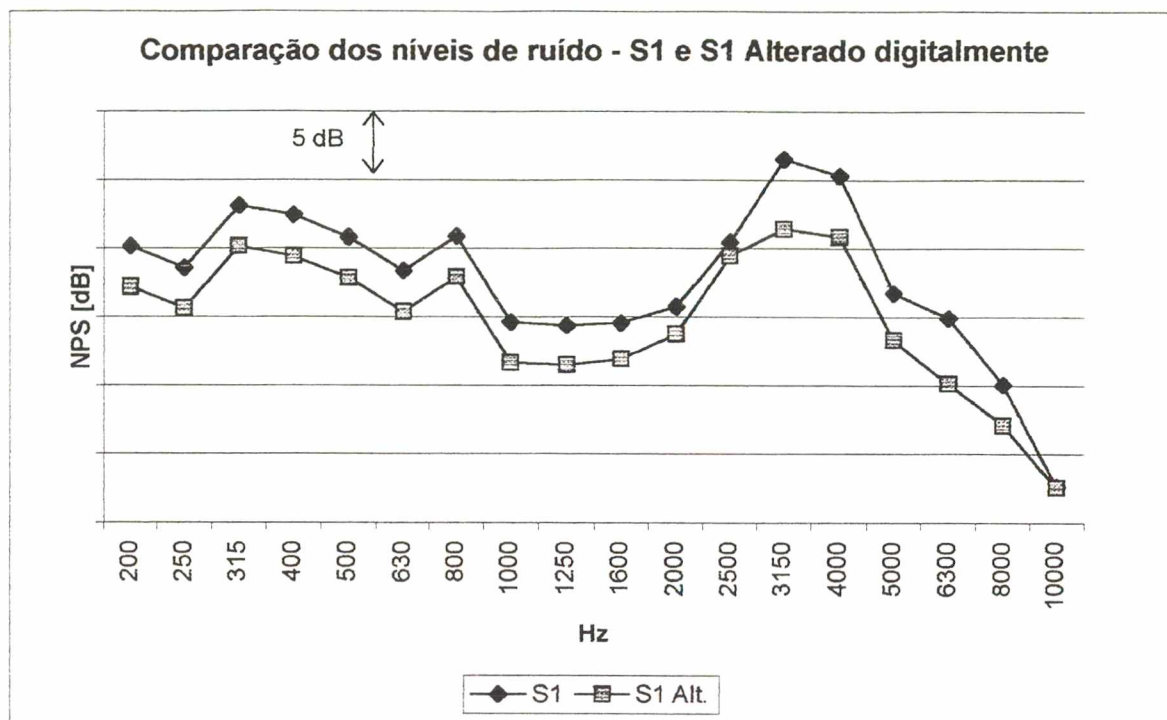


Figura 4.45 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) dos sistemas de refrigeração S1 e S1 Alterado digitalmente.

A alteração digital chegou a reduzir em até 5 dB algumas bandas (Figura 4.45), havendo uma redução em toda a faixa de freqüência analisada, sendo esta alteração refletida diretamente na resposta do “loudness”, mostrado na Figura 4.46, tendo maior influência na faixa de 16 Bark a 19 Bark (bandas de 3.150 Hz a 5.000 Hz).

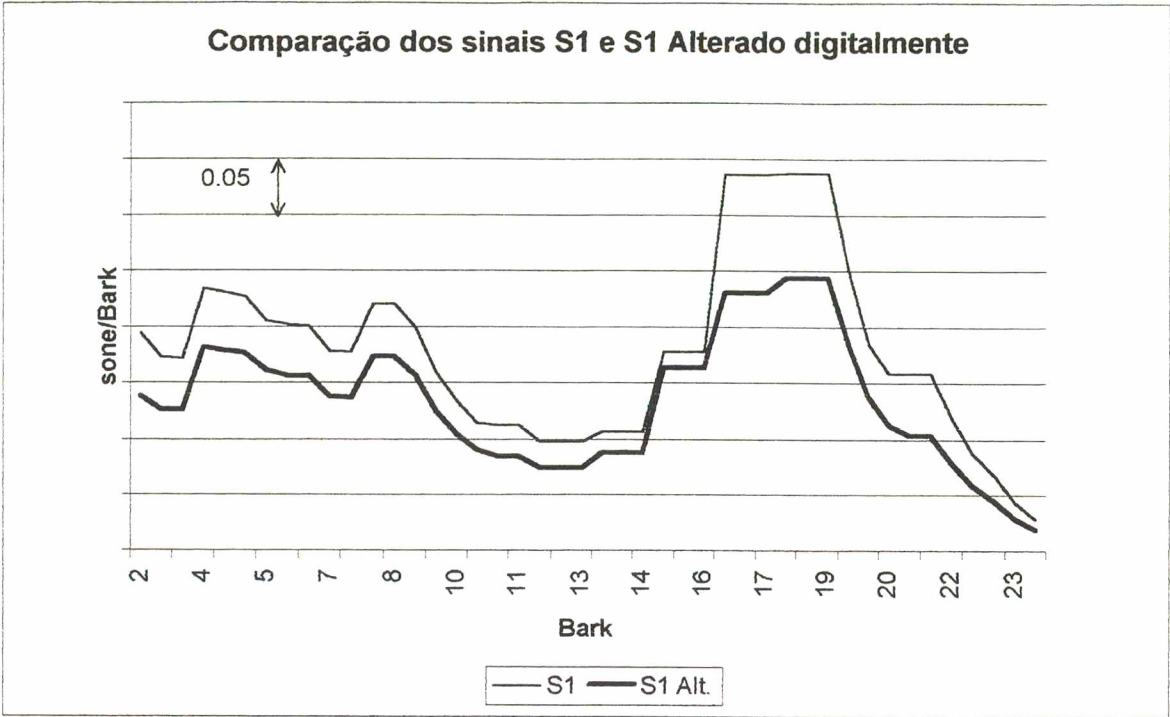


Figura 4.46 - Comparação do "loudness" dos sistemas de refrigeração S1 e S1 Alterado digitalmente.

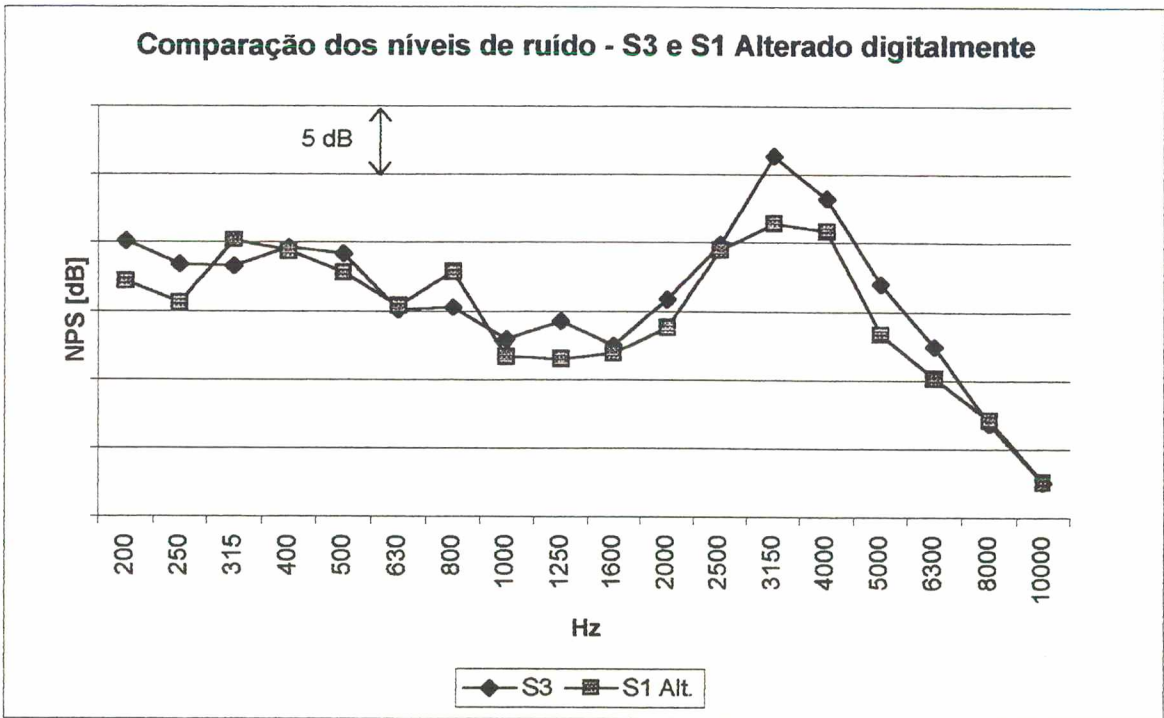


Figura 4.47 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) dos sistemas de refrigeração S3 e S1 Alterado digitalmente.

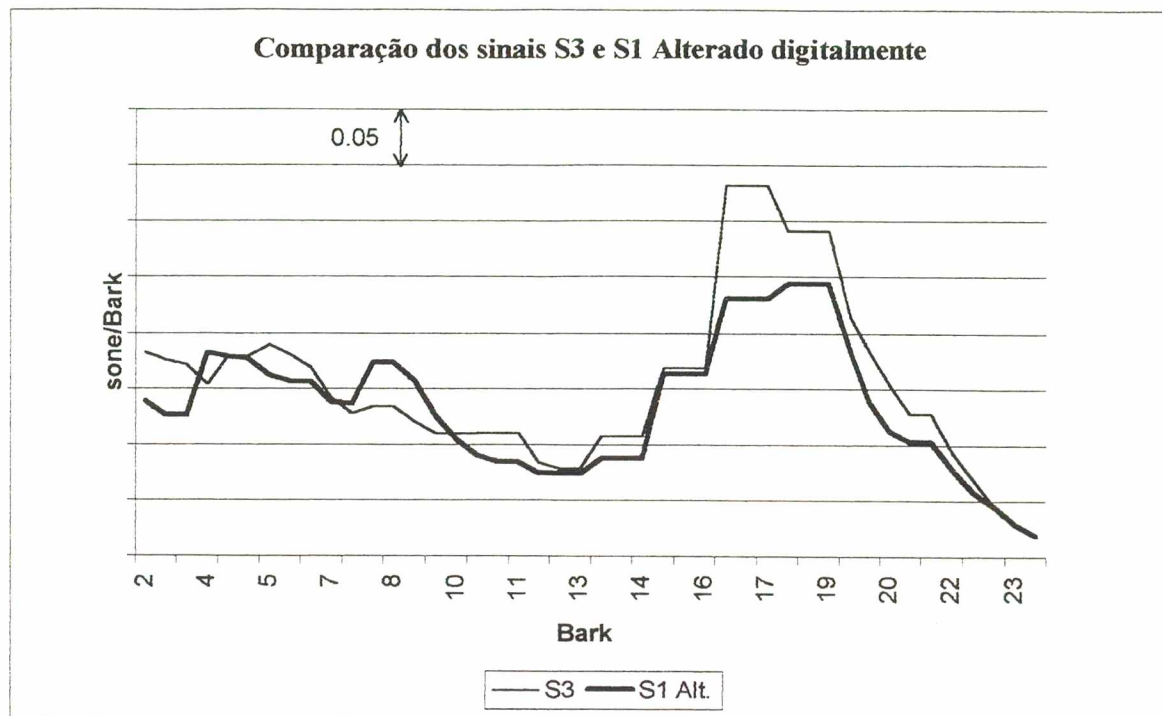


Figura 4.48 - Comparação do "loudness" dos sistemas de refrigeração S3 e S1 Alterado digitalmente.

A comparação entre os sinais do sistema de refrigeração S3 e os sinais do sistema de refrigeração S1 alterado (Figura 4.47 e Figura 4.48) apresentam alterações significativas principalmente nas bandas de 3.150 Hz a 5.000 Hz (16 Bark à 19 Bark), sendo que nas demais a alteração foi menor, mantendo nas demais bandas níveis muito semelhantes.

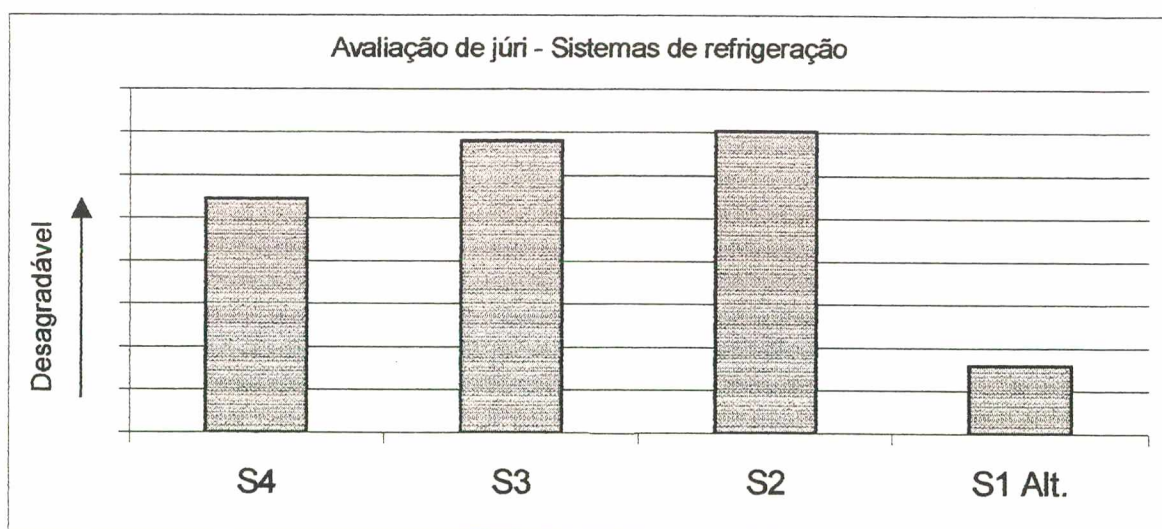


Figura 4.49 - Resposta da avaliação do júri com o sistema de refrigeração S1 alterado.

A avaliação de júri dos sistemas de refrigeração com o sistema S1 alterado mostra que a alteração realizada apresentou-se altamente satisfatória e efetiva (Figura 4.49) havendo uma grande redução na avaliação dos jurados. Não ocorreu neste caso o efeito de alteração das avaliações dos outros sistemas de refrigeração em função da alteração da referência, como ocorrido com o compressor.

Na Figura 4.50 pode-se observar que os níveis dos sinais de ruído em dB e em dB(A) apresentam uma correlação fraca com a avaliação dos jurados não podendo-se afirmar com convicção que avaliações subjetivas relacionadas a sistemas de refrigeração possam utilizar estes valores como referência.

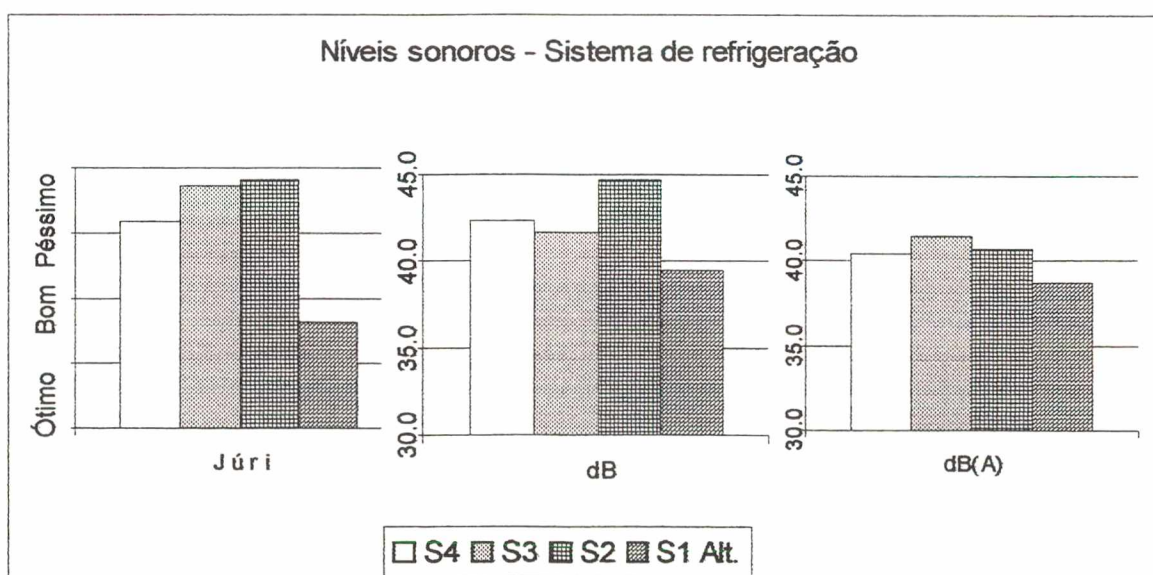


Figura 4.50 - Comparação da avaliação do júri com os níveis em dB e dB(A).

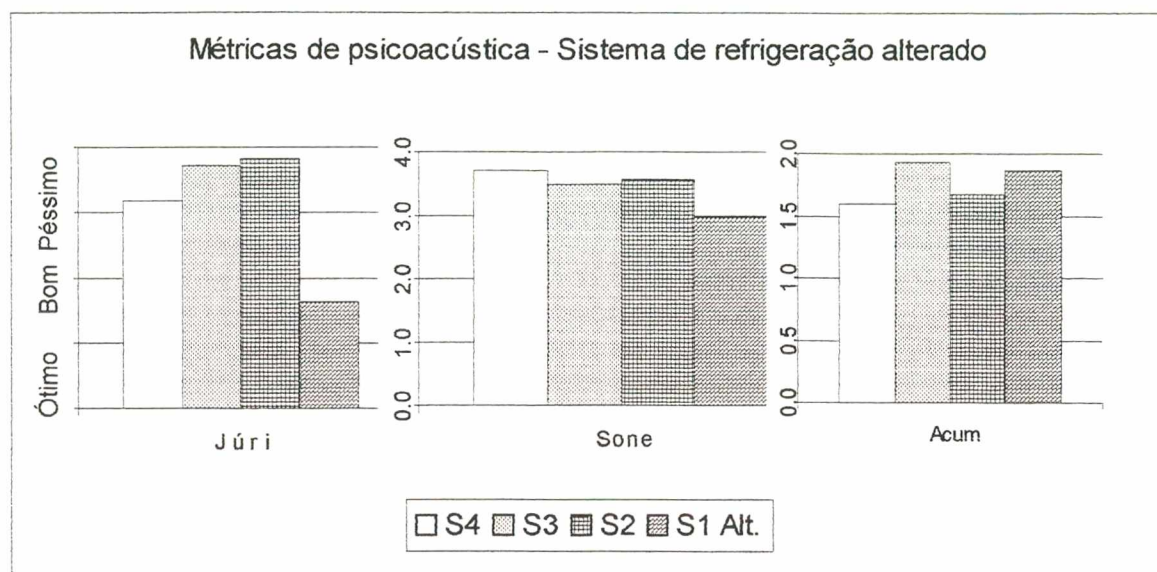


Figura 4.51 - Comparação da avaliação do júri com as métricas “loudness” e “sharpness”.

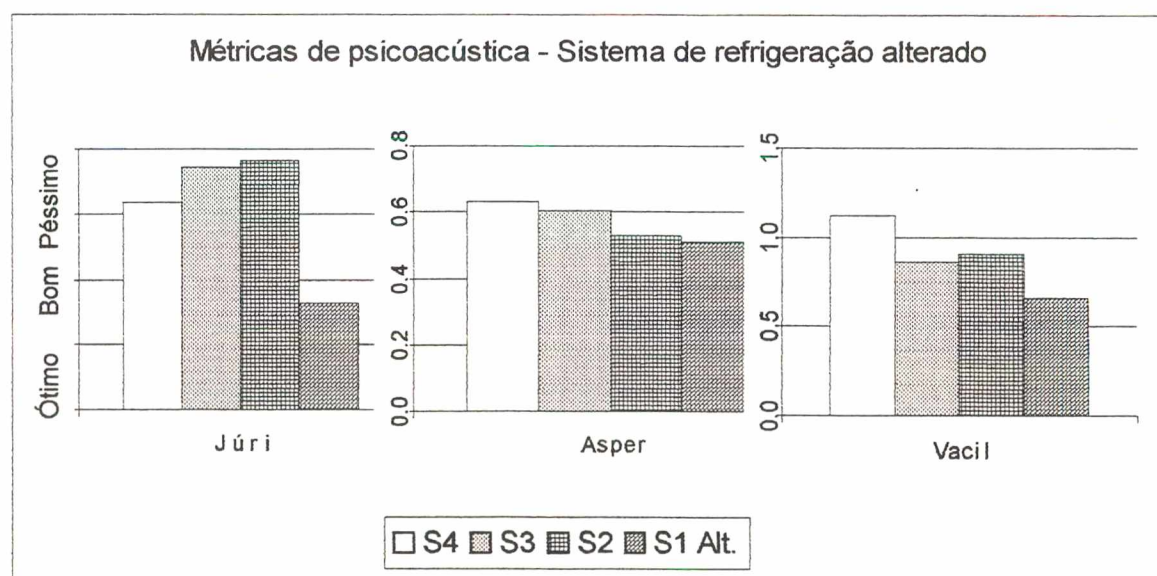


Figura 4.52 - Comparação da avaliação do júri com as métricas “roughness” e “fluctuation strength”.

As correlações das métricas de “loudness” com a avaliação do júri tornaram-se quase inversas, pois as diferenças entre os sinais S2 e S3 são muito pequenas, assim,

excetuando-se o sinal alterado, nos demais quanto melhor avaliado maior o valor do “loudness”, não havendo qualquer alteração efetiva no caso do “sharpness”.

O “roughness” manteve a sua característica de correlação inversa com os resultados da análise de júri, sendo que o sinal do sistema de refrigeração S1 alterado apresentou uma redução significativa, alterando a característica da correlação. Quanto ao “fluctuation strength”, este continua não apresentando um padrão de correlação com a avaliação do júri para os sistemas de refrigeração.

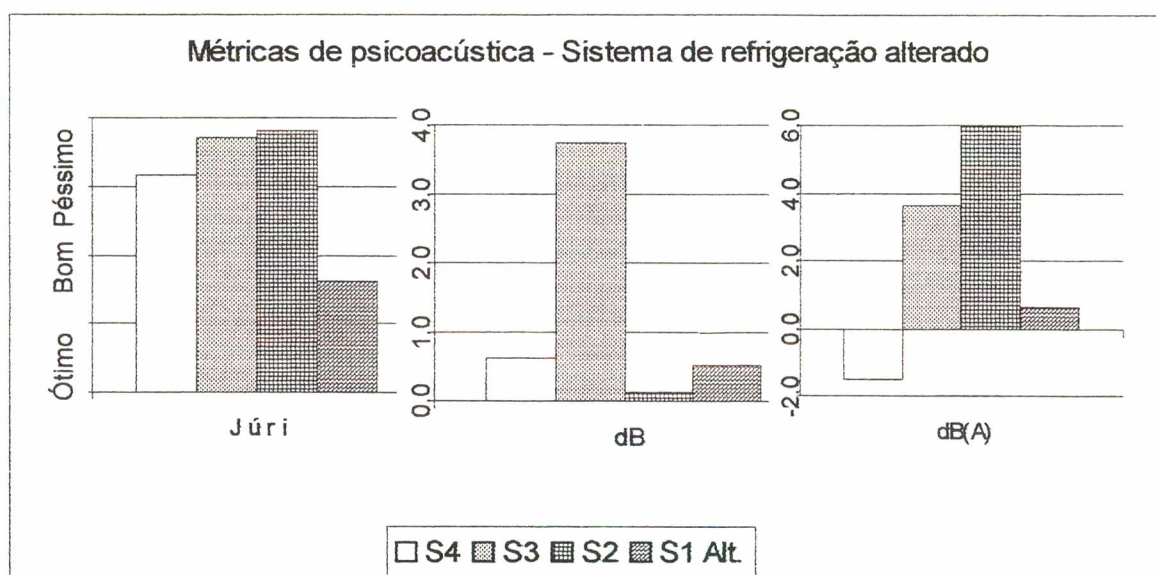


Figura 4.53 - Comparação da avaliação do júri com as métricas “tone-to-noise ratio” e “proeminence ratio”.

Quanto às métricas de avaliação de tons puros estas apresentaram uma redução para o sistema de refrigeração S1, mas ainda assim não se pode reconhecer nenhum padrão de correlação com a avaliação de júri (Figura 4.53).

4.3 Correlação das respostas dos compressores com as respostas dos sistemas de refrigeração

A correlação entre os dados dos compressores e dos sistemas de refrigeração podem apresentar indicativos da influência destes sobre o ruído dos compressores, auxiliando no desenvolvimento de novas formas de análise para alterações nos projetos dos compressores.

Nas Figuras 4.54 e 4.55 estão mostradas as relações entre o compressor C1 e o sistema de refrigeração S1, e pode-se observar que a tendência dos sinais é semelhante na região de médias freqüências, havendo uma equalização dos sinais na faixa de altas freqüências. Isto ocorre nos espectros de ruído e de *"loudness"*.

Nas respostas do compressor C2 e sistema de refrigeração S2 (Figuras 4.56 e 4.57) ocorre uma troca de tendências na faixa de médias freqüências, ocasionando uma resposta do compressor instalado neste sistema de refrigeração semelhante a anterior, porém com um ponto de inflexão distinto, 1600 Hz (12 Bark) ao invés de 2.000 Hz (cerca de 14 Bark) do conjunto C1/S1.

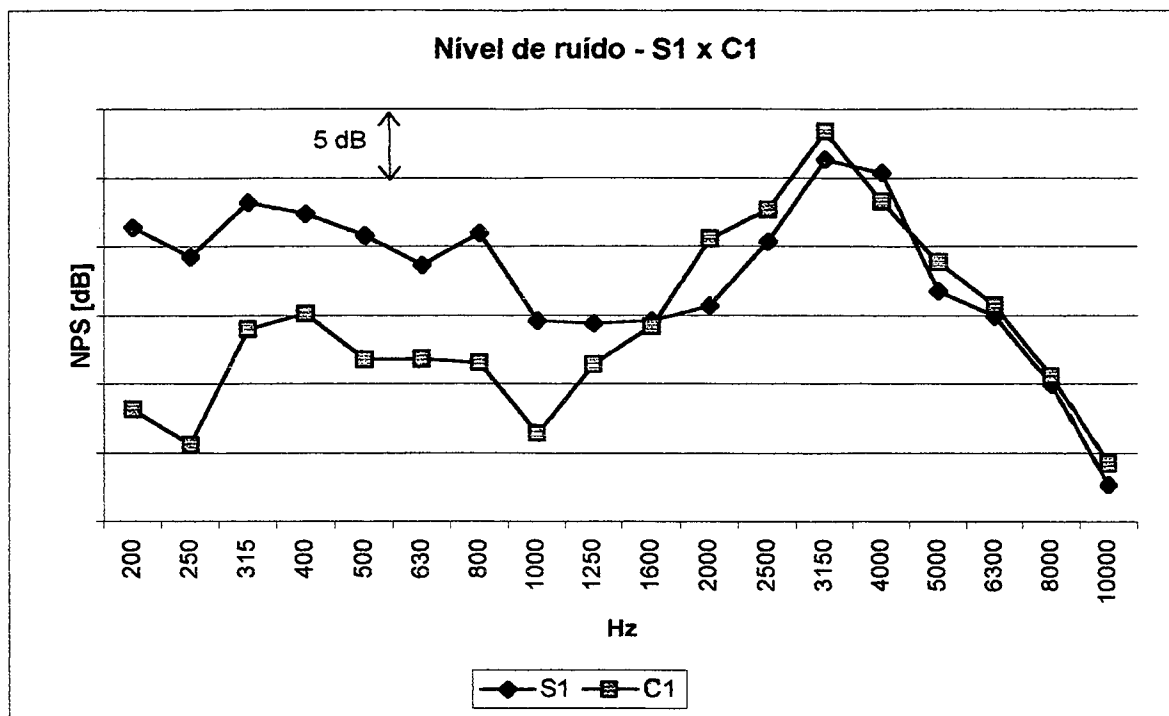


Figura 4.54 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) do compressor C1 e do sistema de refrigeração S1.

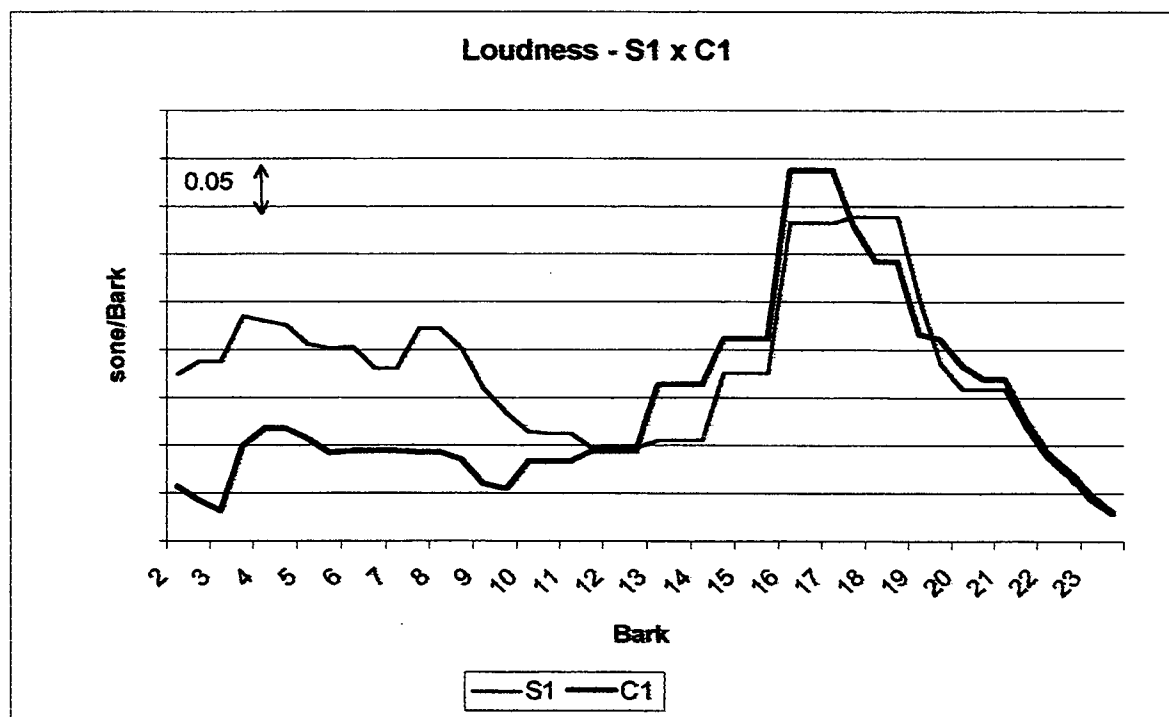


Figura 4.55 - Comparação do "loudness" do compressor C1 e do sistema de refrigeração S1.

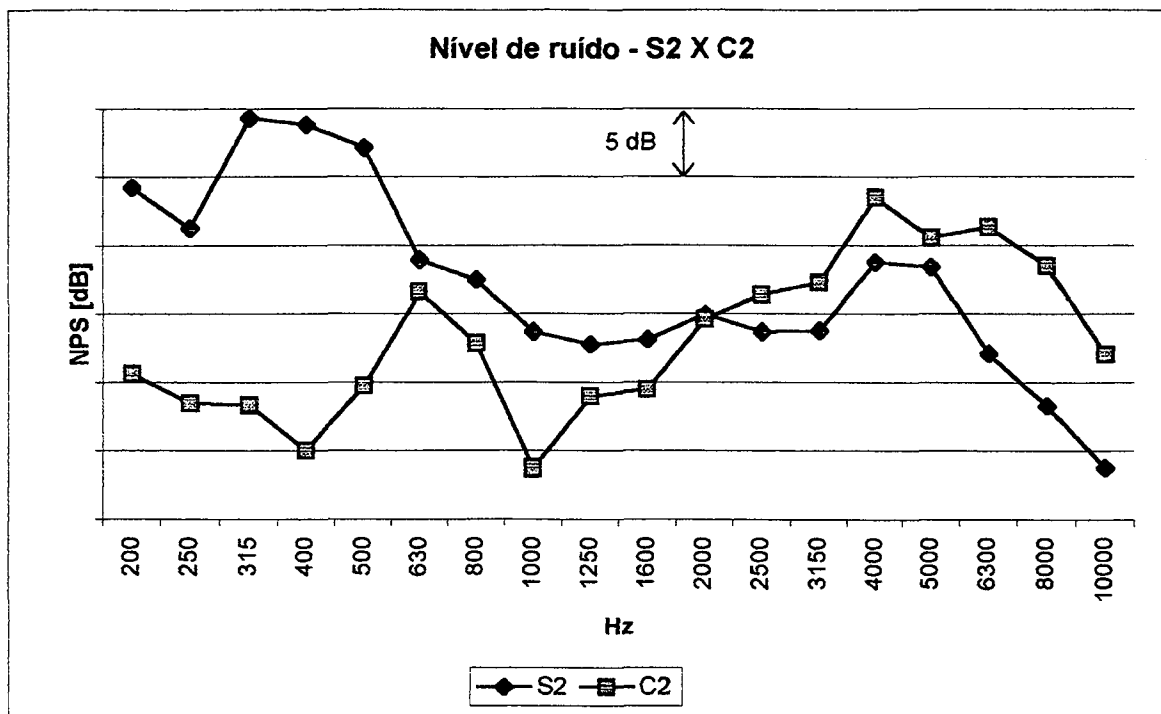


Figura 4.56 - Comparação do nível de pressão sonora do compressor C2 e do sistema de refrigeração S2.

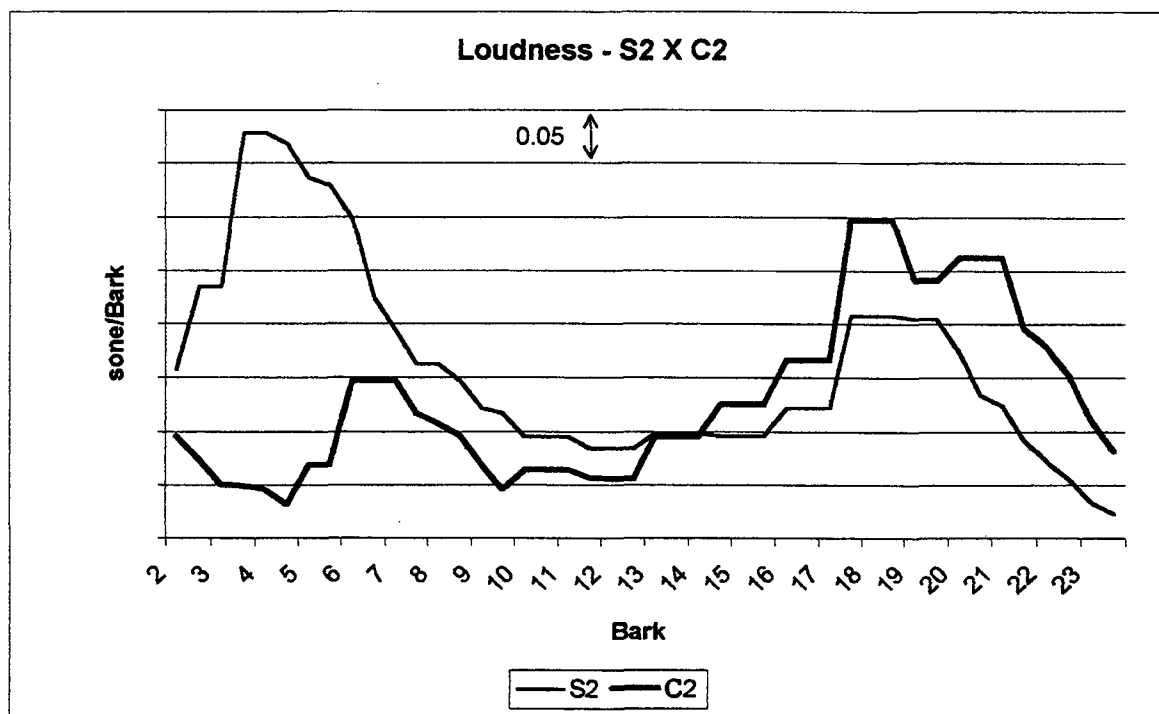


Figura 4.57 - Comparação do "loudness" do compressor C2 e do sistema de refrigeração S2.

As respostas do compressor C3 e do sistema de refrigeração S3 seguem a mesma tendência de inversão dos níveis, apresentando porém alguns valores mais próximos uns dos outros na região de baixa frequência, mantendo nos demais pontos a mesma característica dos demais compressores, com um ponto de inflexão na banda de 1.250 Hz, em torno de 11 Bark, menor do que dos demais compressores/sistemas de refrigeração.

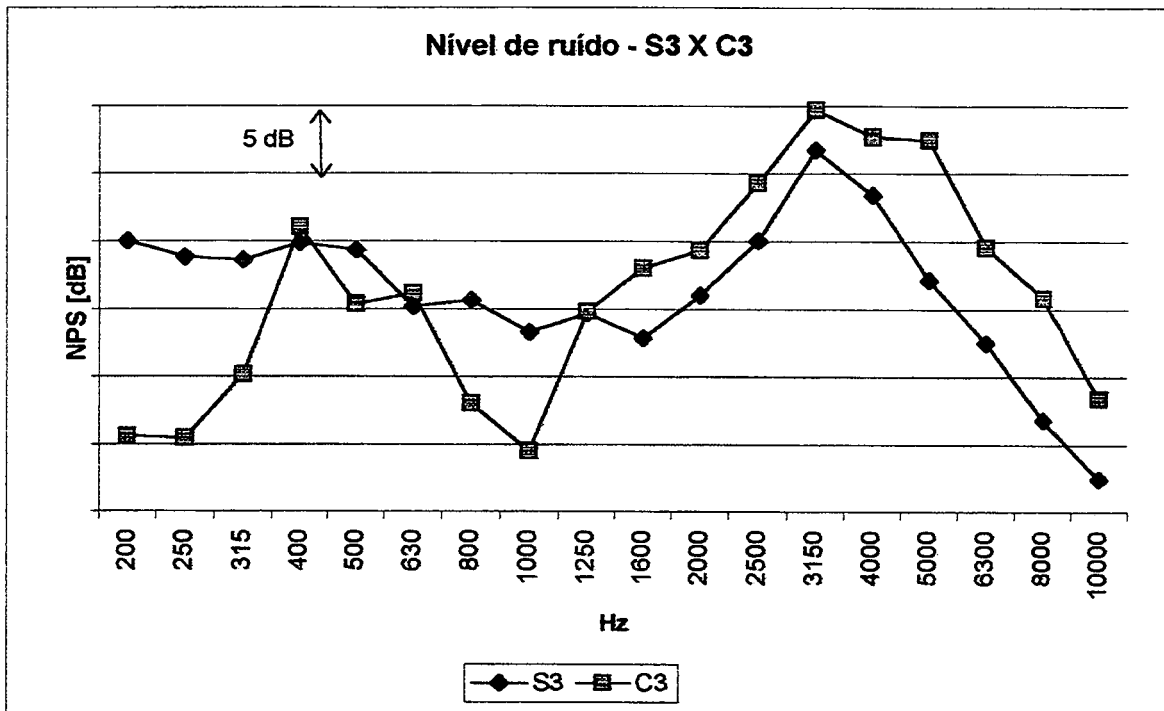


Figura 4.58 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) do compressor C3 e do sistema de refrigeração S3.

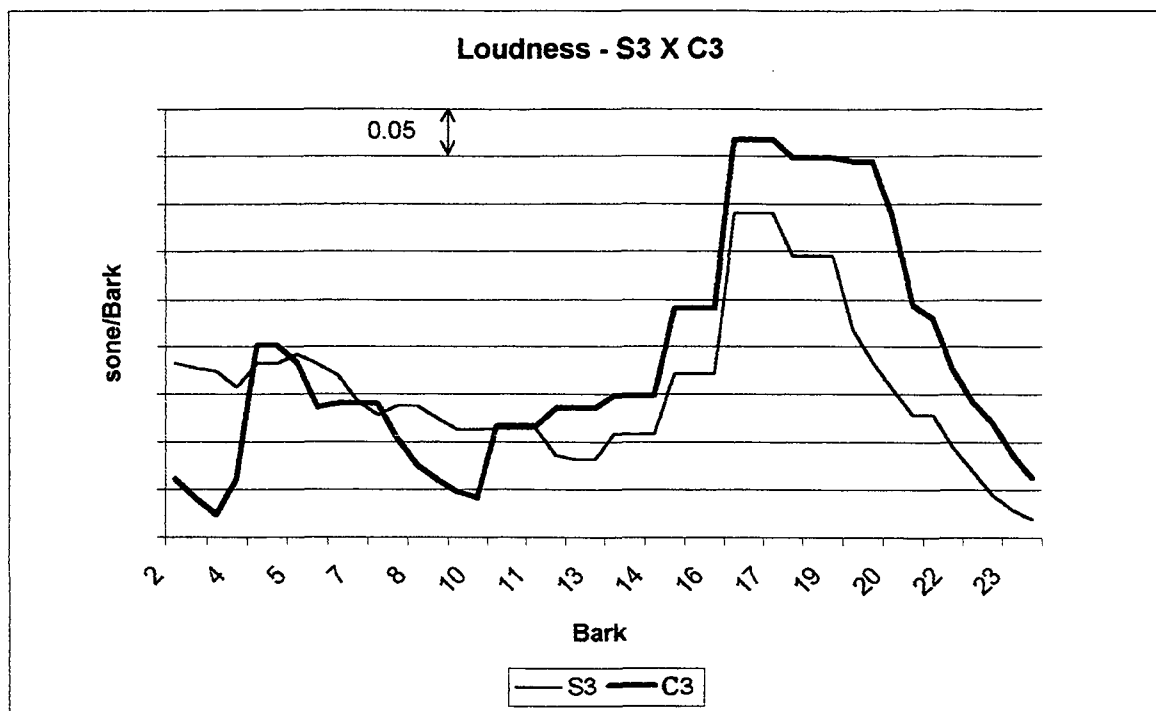


Figura 4.59 - Comparação do "loudness" do compressor C3 e do sistema de refrigeração S3.

O compressor C4 comparado com o sistema de refrigeração S4 apresenta as respostas apresentadas nas Figuras 4.60 e 4.61, mantendo o mesmo formato de resposta apresentado nos conjuntos anteriores, mas apresentando uma distribuição nas diferenças dos sinais mais linear do que dos demais conjuntos, e tendo um deslocamento do ponto de inflexão para a banda de 2.500 Hz (entre 15 Bark e 16 Bark).

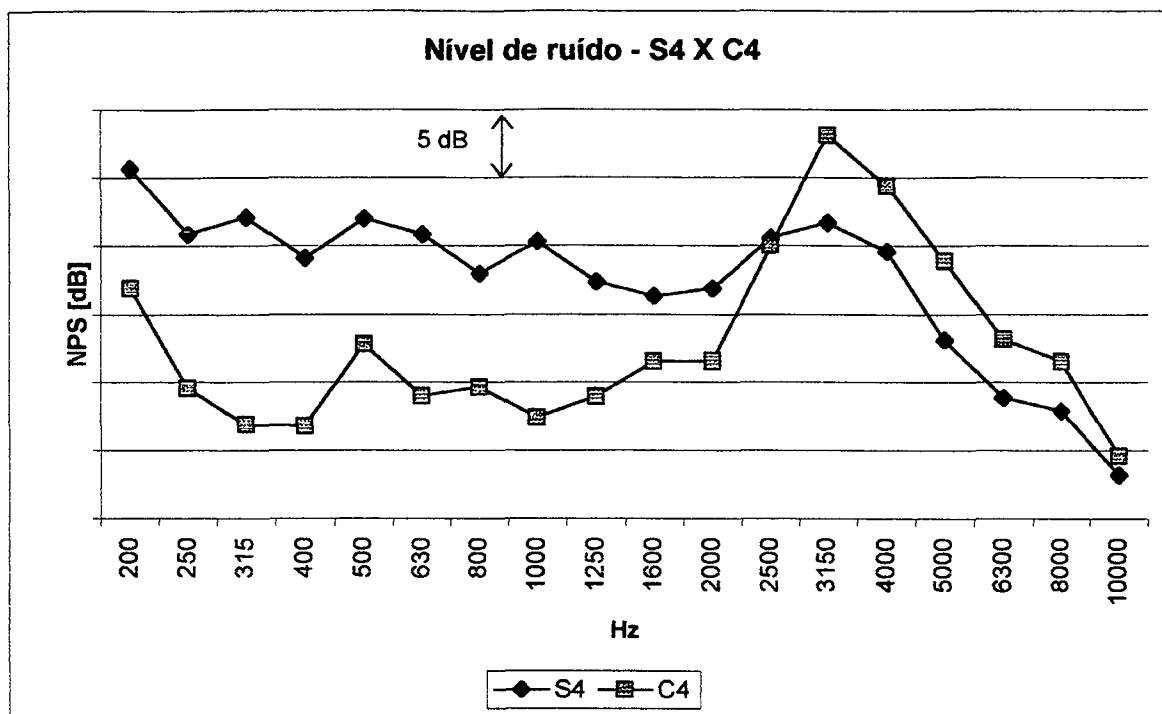


Figura 4.60 - Comparação do nível de pressão sonora (NPS) do compressor C4 e do sistema de refrigeração S4.

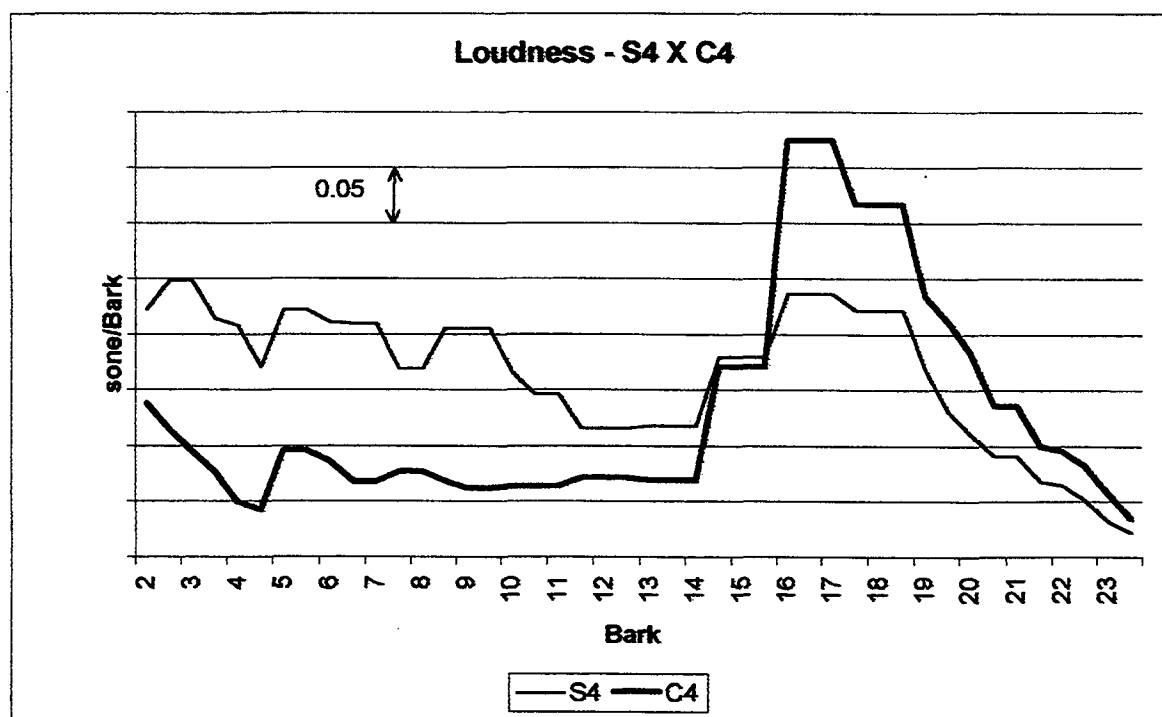


Figura 4.61 - Comparação do "loudness" do compressor C4 e do sistema de refrigeração S4.

A comparação das métricas dos compressores e dos sistemas de refrigeração mostra que a tendência apresentada pela avaliação de júri e do “loudness” são semelhantes, diferenciadas apenas pela diferença do conjunto compressor/sistema de refrigeração 4 (Figuras 4.62 e 4.63). O “sharpness” apresentou uma tendência de variação semelhante entre a resposta do compressor e do sistema de refrigeração, sendo este apresentando sempre um valor menor que o primeiro, havendo uma única diferença na tendência no conjunto compressor/sistema de refrigeração 2, mostrado na Figura 4.64.

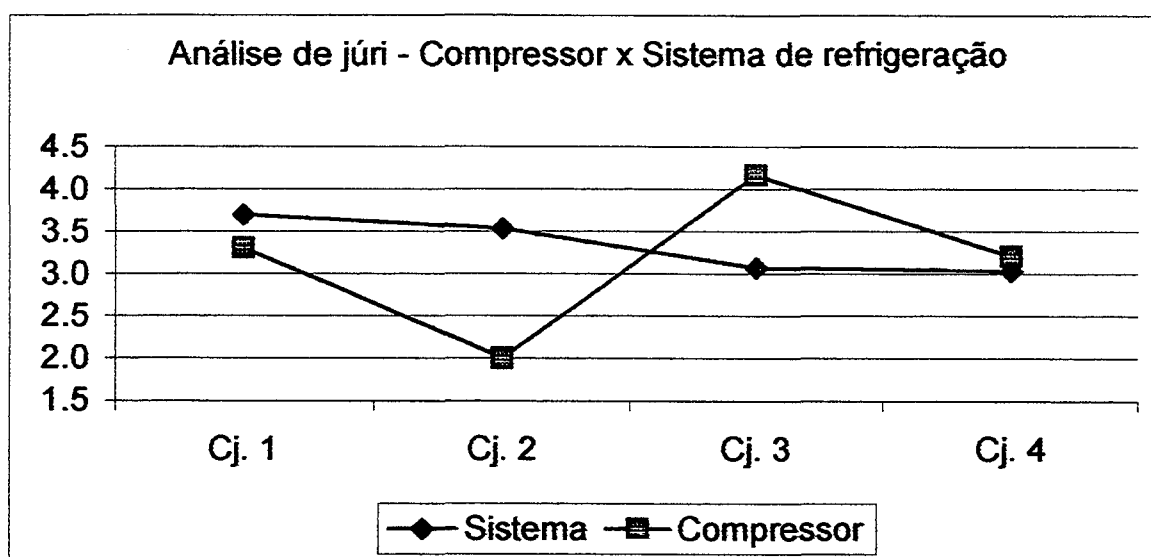


Figura 4.62 - Relação da análise de júri dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração.

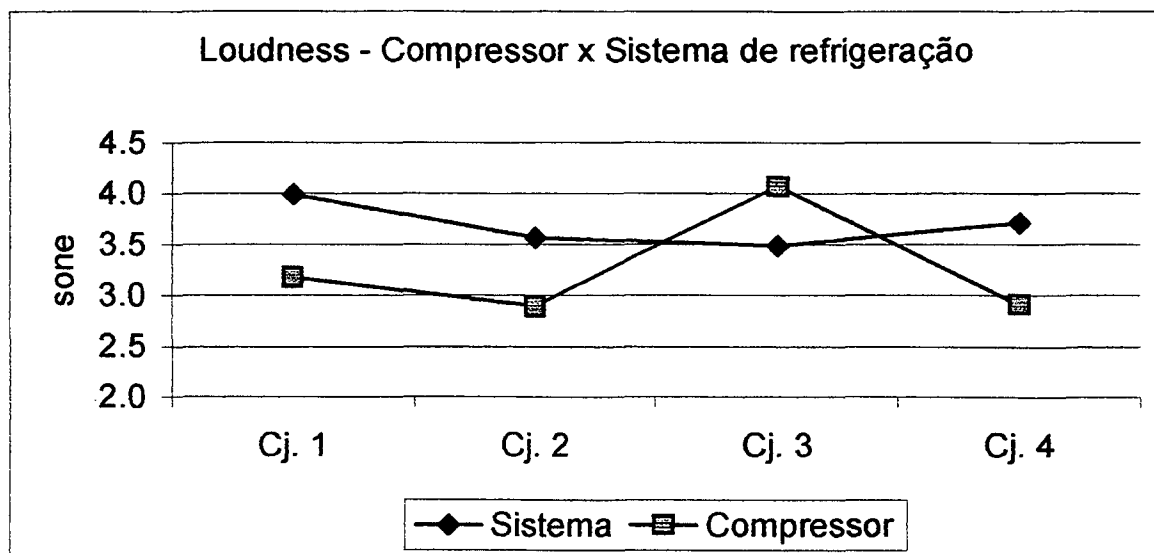


Figura 4.63 - Relação do valor do "loudness" dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração.

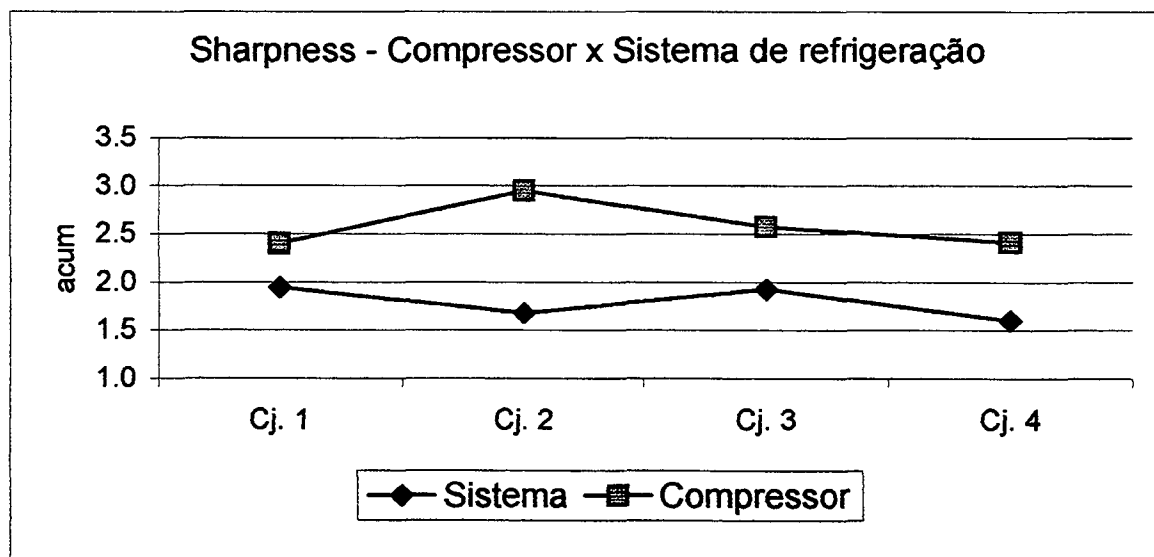


Figura 4.64 - Relação do valor do "sharpness" dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração.

O "roughness" (Figura 4.65) apresenta uma relação semelhante à do "sharpness", ocorrendo uma discrepância na tendência na resposta do conjunto compressor/sistema de refrigeração 4, pois as demais tendem a se afastar umas das outras.

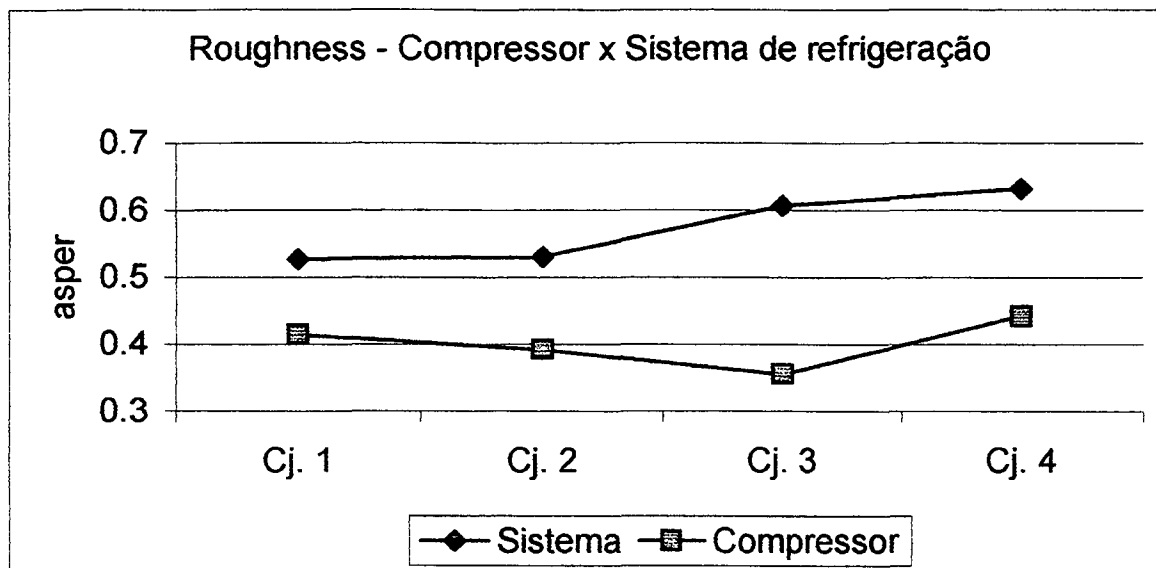


Figura 4.65 - Relação do valor do "roughness" dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração.

A Figura 4.66 apresenta a relação do fluctuation strenght, que segue a mesma tendência da resposta do "loudness". Quanto à métrica relacionada aos tons puros, cujos resultados estão mostrados nas Figuras 4.67 e 4.68, no "tone-to-noise ratio" não se reconhece qualquer padrão de tendência, já no "proeminence ratio" há uma tendência inversa nos sinais.

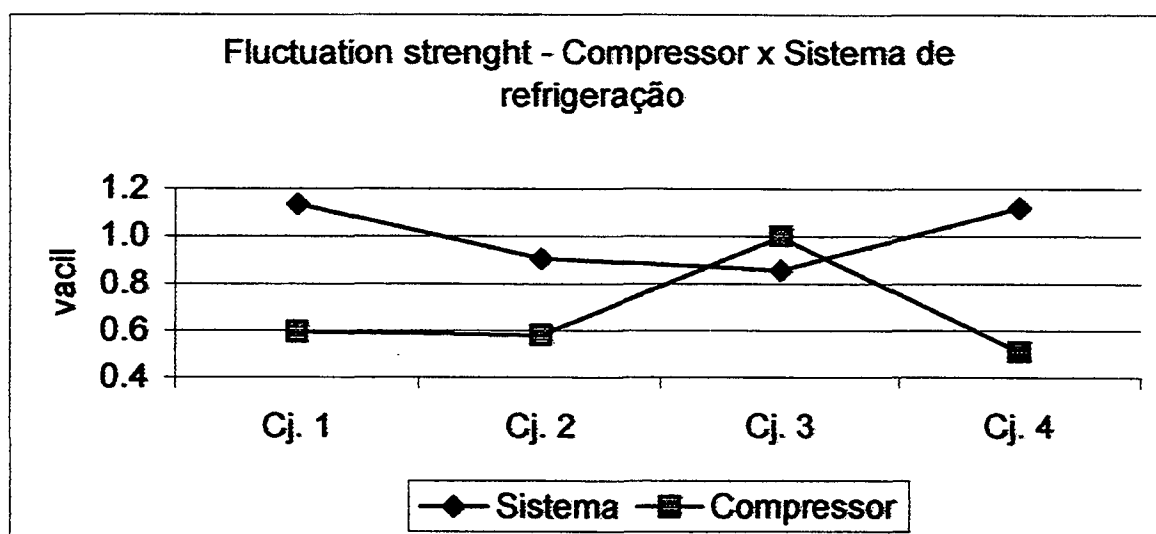


Figura 4.66 - Relação do valor do fluctuation strenght dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração.

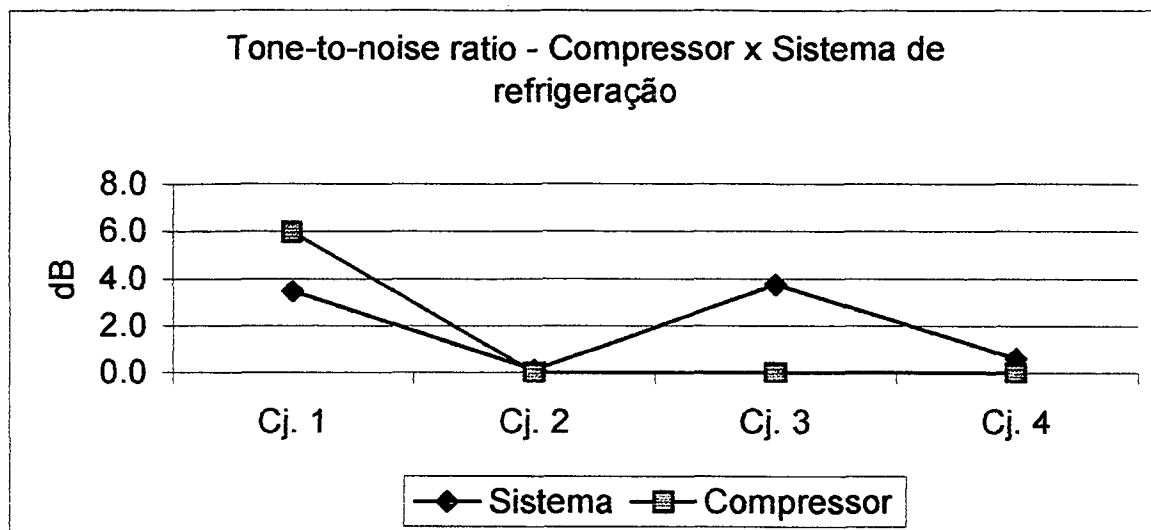


Figura 4.67 - Relação do valor do "tone-to-noise ratio" dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração.

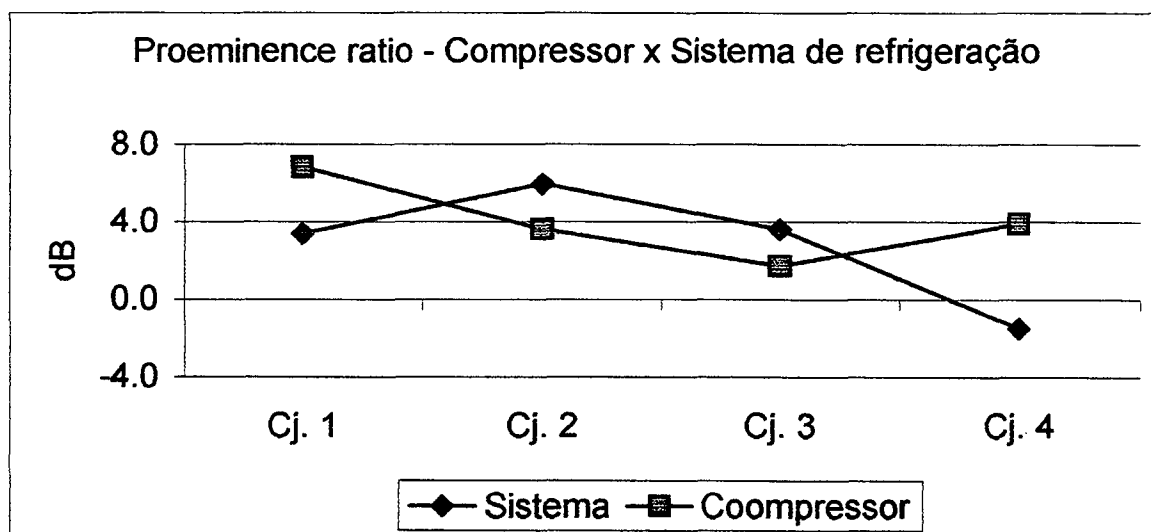


Figura 4.68 - Relação do valor do "proeminence ratio" dos conjuntos compressor/sistema de refrigeração.

A relação entre os sinais considerando os níveis tanto em dB, quanto em dB(A), mostradas nas Figuras 4.69 e 4.70, não apresentam qualquer tendência explícita, sendo que os níveis em dB(A) do sistema sofrem uma atenuação bem maior do que os níveis do compressor, ocorrendo principalmente em função da maior influência das componentes de baixas frequências.

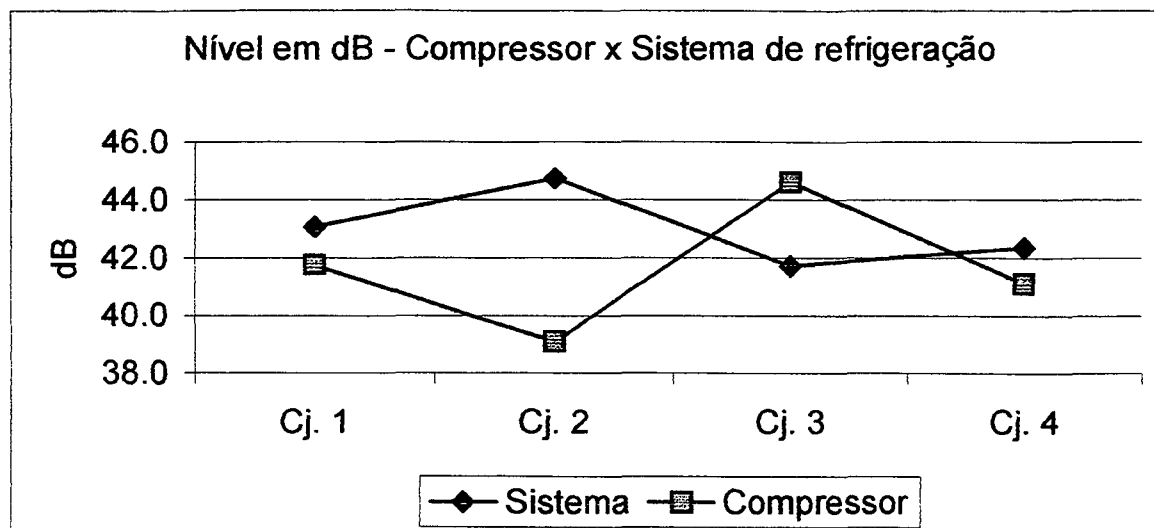


Figura 4.69 - Relação do nível em dB dos compressor/sistema de refrigeração.

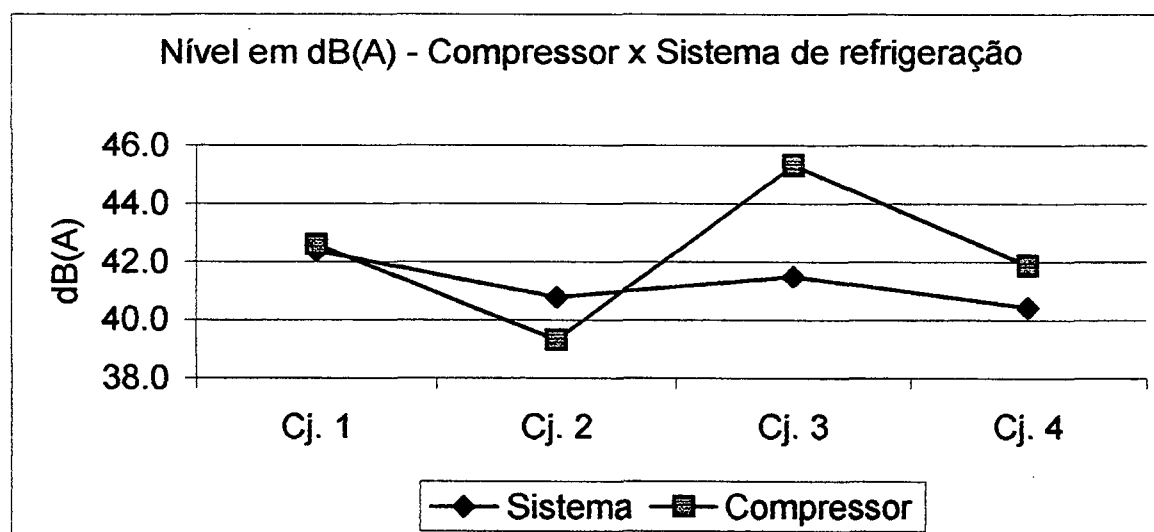


Figura 4.70 - Relação do nível em dB(A) dos compressor/sistema de refrigeração.

Tem-se, ainda, a correlação das respostas estimuladas quanto às características percebidas dos sinais, e que possuem suas relações com as métricas da psicoacústica, sendo apresentadas nas Figuras 4.71 e 4.72. São apontados o número de jurados que apresentaram alguma indicação quanto à característica mais acentuada percebida, sendo apresentados nos gráficos as respostas quanto ao funcionamento dos sistemas de

refrigeração, e em ambos os casos, compressor e sistema de refrigeração, considerando as apresentações via fones de ouvido.

As características relacionam os sons agudos com o “*sharpness*”, as modulações com o “*fluctuation strength*” e o “*roughness*”, e o tom puro com o “*proeminence ratio*” e com o “*tone-to-noise ratio*”. A característica de graves podem indicar um maior valor do “*loudness*” e um menor valor do “*sharpness*”, porém diferentemente das demais o “*loudness*” não é simplesmente relacionado com as componentes de baixa frequência, sendo este apenas um dos indicadores do seu valor, já que ele é influenciado até mesmo pelas demais métricas.

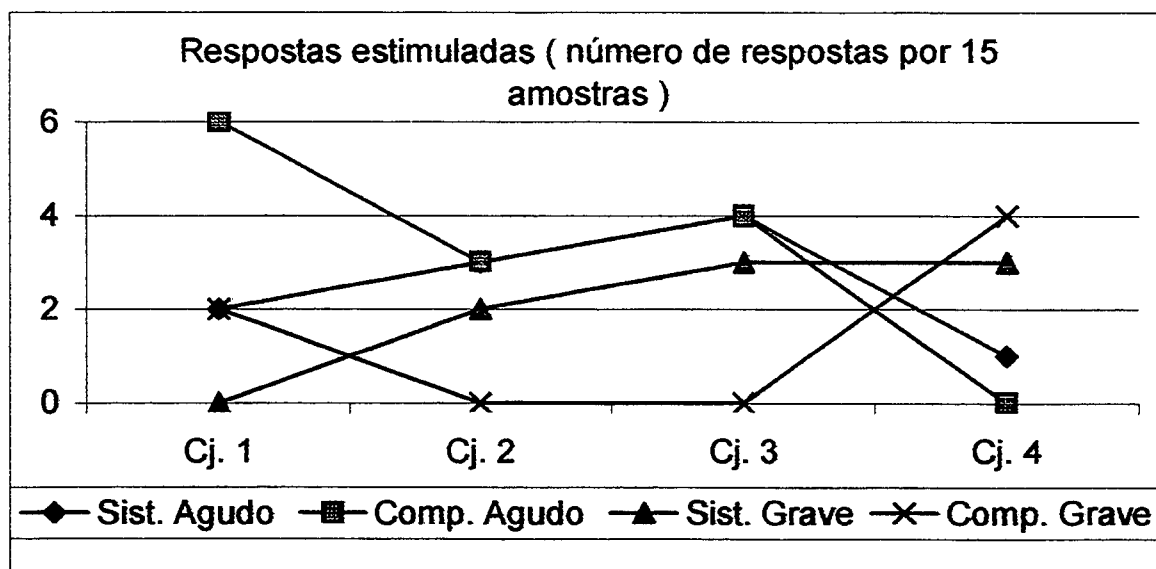


Figura 4.71 - Número de respostas dadas pelos 15 jurados em relação às questões com respostas estimuladas dos questionários dos itens de componentes graves e agudos.

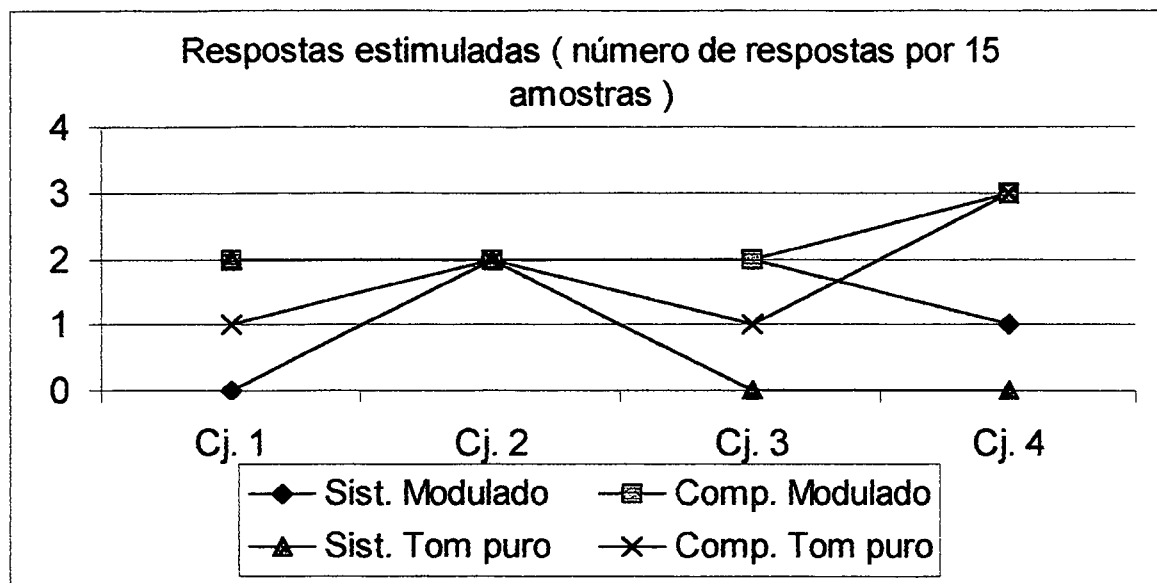


Figura 4.72 - Número de respostas dadas pelos 15 jurados em relação às questões com respostas estimuladas dos questionários dos itens de componentes modulados e de tons puros.

As respostas apresentadas na Figura 4.71, relacionando as características de graves e agudos, mostram que considerando os sistemas de refrigeração o máximo de apontamentos que ocorreram foram 4 no sistema de refrigeração S3, e nos demais sistemas de refrigeração foram apontadas duas ou três respostas, porém não podendo-se relacionar com as métricas, pois além de poucos apontamentos existem apontamentos divergentes, indicando componentes graves e agudos no mesmo sistema.

Quanto às respostas apontadas na avaliação dos compressores, houve respostas divergentes apenas no compressor C1, havendo apontamento nas demais, sendo porém apontadas apenas 4 indicações nestes casos. Considerando a correlação sistema de refrigeração/compressor apenas o conjunto 4 apresentou uma resposta semelhante, ocorrendo nas demais as respostas opostas umas às outras.

Quanto às respostas dos sistemas de refrigeração relacionando os itens de modulação e tons puros houve no máximo dois apontamentos, não cabendo qualquer

análise, pois representa menos de 15 % das amostras possíveis. Ocorrendo o mesmo com as respostas apontadas referentes aos compressores, onde apenas o compressor C4 apresentou 3 apontamentos quanto à modulação, e os demais no máximo 2 apontamentos.

Embora estas questões tenham sido colocadas como forma de apoio no reconhecimento das características de incômodo nos ruídos apontadas pelos jurados elas se mostraram superficiais na sua função, uma causa provável pode ter sido a falta de capacidade dos jurados em reconhecer as características ou até a falta de interesse dos mesmos em relação às questões. Embora nestas avaliações estas questões tenham sido mal exploradas elas continuam sendo um ótimo apoio para o reconhecimento das características de incomodidade dos ruídos.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento das formas de aplicação da metodologia de qualidade sonora apresentou alguns desafios, principalmente devido à escassez de material bibliográfico específico para se utilizar como suporte. Porém estas dificuldades resultaram em benefícios pois estimularam o detalhamento das várias atividades relacionadas ao desenvolvimento da metodologia.

Dentre as etapas apresentadas ao longo do trabalho as mais complexas para o seu desenvolvimento foram as relacionadas à análise de júri, pois o caráter altamente subjetivo das avaliações é influenciado pelo estado momentâneo do humor dos jurados, à sua sensibilidade perante a estrutura física do júri, e até mesmo a horários a que foram submetidos aos testes.

Para seleção dos jurados foram observadas algumas dificuldades, crescentes com o aumento do número dos integrantes do grupo, relativas à manutenção do interesse e à cooperação dos mesmos durante a realização das avaliações. Foi observada certa dificuldade quanto ao retorno dos jurados para a realização da segunda e terceira rodadas da avaliação, os quais apresentaram uma série de motivos, dentre os quais podem-se citar a interferência com suas rotinas de trabalho e a perda de interesse por não estarem diretamente envolvidos com o projeto.

Quanto aos tempos de apresentação dos sinais e intervalo entre eles podem variar de acordo com as características dos sinais a serem analisados, sendo recomendada uma avaliação prévia para a determinação dos tempos que ofereçam a melhor capacidade de avaliação dos jurados. A forma de apresentação dos sinais deve ser analisada de acordo

com o objetivo, utilizando a apresentação por pares no caso de sinais com grande semelhança e a avaliação por grupos de sinais no caso de sinais facilmente distinguíveis.

A utilização do software, apesar de simples nos seus comandos, necessitou de um tempo considerável para assimilação em função do grande número de possibilidades para análise e edição dos sinais e, principalmente, para o desenvolvimento da sensibilidade para a determinação dos níveis de redução e faixas de frequência em que os jurados já apresentam capacidade de reconhecimento da alteração.

Obviamente esta sensibilidade não apresenta uma regra fixa, pois vai ter uma dependência direta da distribuição do sinal a ser alterado, porém pôde-se observar que quanto menor a faixa de frequência maior deve ser o nível de redução da amplitude do sinal para se obter o reconhecimento da alteração. De uma maneira geral, considerando bandas de terço de oitava, variações entre 3 dB, para médias e altas frequências, e 5 dB, para baixas e médias frequências, já permitem uma diferenciação clara pelos jurados das alterações realizadas.

No caso dos sinais dos compressores e sistemas de refrigeração, reduções nas bandas de baixa frequência, até 400 Hz, determinam uma redução nas métricas de modulação, *“fluctuation strength”* e *“roughness”*, além de ocasionarem a redução do *“loudness”* e conseqüentemente o aumento do valor do *“sharpness”*, em função da sua característica de avaliação das componentes de alta frequência.

Alterações nas faixas de médias e altas frequências (acima de 400 Hz) apresentam maior influência para variação dos valores do *“loudness”* e do *“sharpness”*, havendo mesma tendência de variação em ambas.

As métricas de tom puro, *tone-to-noise* e *“proeminence ratio”*, não apresentaram qualquer relação com as alterações analisadas, havendo grande variações nos seus valores

ocasionadas, algumas vezes, por pequenas alterações, em consequência da região que sofreu a redução estar certamente provocando o efeito de mascaramento em componentes de tom puro.

A determinação de correlações entre as métricas da psicoacústica e os resultados do júri nas avaliações dos ruídos dos compressores apontou a existência de correlação apenas entre os valores de “*loudness*” e as respostas do júri, além da correlação com a resposta ponderada pela curva A, dB(A), embora as amplitudes dos valores em dB(A) e do “*loudness*” apresentem variações diferentes. Considerando a análise com o compressor com alteração digital obtiveram-se as mesmas tendências.

Os sistemas de refrigeração, por outro lado, não apresentaram correlação bem definida entre os resultados das métricas e as respostas da avaliação do júri, nem mesmo com as respostas ponderadas pela curva A, dB(A). Considerando a comparação entre a avaliação com apresentação direta e via fones de ouvido ocorreu apenas uma discrepância analisando-se o funcionamento, mantendo-se a tendência para os demais.

A comparação na avaliação pela apresentação direta dos jurados aos sistemas de refrigeração e via fones de ouvido confirmaram a vantagem em se utilizar a segunda pela facilidade de repetição dos sinais, para confirmação das impressões iniciais, e pela garantia da estabilidade do sistema, reproduzindo a condição normal de uso, que não se alcança na apresentação direta.

Quando os resultados das métricas da psicoacústica, das avaliações de júri e dos níveis em dB e dB(A) dos compressores e dos sistemas de refrigeração são comparados encontra-se uma tendência com uma discrepância em apenas um conjunto, mantendo-se o compressor com valores inferiores em todos os quesitos, exceto no “*sharpness*” onde os sistemas de refrigeração apresentam valores maiores.

Esta característica dos valores do “*sharpness*” confirmam o fato das componentes de baixa frequência dos sistemas de refrigeração apresentarem valores maiores, o que resulta na atenuação dos valores do “*sharpness*”.

A partir destes resultados concluiu-se que a determinação de uma correlação para os compressores com as métricas da psicoacústica ainda não é possível, necessitando de maior análise para sua consolidação, e que para os sistemas de refrigeração esta análise é necessária para a confirmação, ou não, da falta de correlação da análise de júri com as métricas da psicoacústica.

Esta análise mais profunda não foi possível em consequência do longo tempo necessário para o desenvolvimento da análise de júri, além da dificuldade em encontrar pessoas dispostas e disponíveis para colaborar.

Além da análise das correlações das respostas da análise de júri e as métricas da psicoacústica as questões de apoio para a identificação de características que apresentassem mais destaque nos sinais devem ser aperfeiçoadas, pois houve poucas indicações destas características, em função da pouca capacidade de compreensão dos jurados em relação aos quesitos (componentes graves, agudos, de modulação e de tom puro), e da difícil identificação destes quesitos nos sinais apresentados.

Uma possível forma de aumentar a capacidade de reconhecimento dos jurados seria a apresentação de sinais com cada uma das características evidenciadas, o que possibilitaria um maior número de respostas a respeito das componentes, facilitando a análise posterior das características que mais causariam incômodo nos jurados.

Como sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros podem-se citar:

- Análises de júri com participação de um maior número de jurados, buscando determinar as possíveis correlações entre as avaliações de júri e as métricas da psicoacústica;
- O desenvolvimento dos questionários de avaliação de exposição a ruídos, de avaliação dos ruídos e do questionário de apoio, considerando formas de estimular a percepção de jurados inexperientes visando o aprimoramento da sua capacidade de avaliação;
- Uma análise de maior envergadura considerando mesmos modelos de compressores montados em diferentes grupos de modelos de sistemas de refrigeração, buscando constatar se há, ou não, alguma tendência fixa relacionada ao compressor;
- Um maior desenvolvimento da sensibilidade das faixas de frequência e níveis de alteração que promovam um reconhecimento da alteração por parte dos jurados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BODDEN, Markus. Instrumentation for sound quality evaluation. Acustica, Vol. 83. pg 775-783. 1997.
2. BORWICK, John. Loudspeaker and headphone handbook. 1988 : London. Butterworth & Co. Ltd.
3. BRÜEL & KJAER. Sound quality workshop. Norcross : 1999. Brüel & Kjaer.
4. BURNS, William. Noise and man. John Murray : London. 1973. 2 ed.
5. CERRATO, Gabriella. CREWE, Alun. WILLIAMS, Roger. Sound quality tools for NHV desing. Sound and Vibration. pg 20-28. Maio 1997.
6. FASTL H., ZWICKER E. Psychoacoustics, facts and models. Berlim : 1999. Springer. 2 ed.
7. FASTL H. The psychoacoustics of sound-quality evaluation. Acustica, Vol. 83. pg 754-764. 1997.
8. GUSKI, Rainer. Psychological methods for evaluating sound quality and assessing acoustic information. Acustica, Vol. 83. pg 765-774. 1997.
9. HAGE, M., MIRANDA G., YAMASHTA E. Soud quality no desenvolvimento de novos produtos. Anais V SIBRAV. 1999.
10. HARTMANN, William M. Signals, sound, and sensation. 1998 : New York. Springer-Verlag Inc.
11. ISO. Acoustics – Method for calculating loudness level – ISO 532. 1975.
12. KEIPER, Winfried. Sound quality evaluation in the product cycle. Acustica, Vol. 83. pg 784-788. 1997.
13. KRYTER, Karl D. The effects of noise on man. New York : 1970. Academic Press.

14. LYON, Richard H. SAE noise & vibration lunch talk. Internet: 1999.
www.sae.org/calendar/nvc99key.htm.
15. MARROQUIN, Mark. Using sound quality in the automotive industry. Anais V SIBRAV. 1999
16. NEUTRIX CORTEX INSTRUMENTS. Psicoacústica – Uma ferramenta para projetos industriais de áudio. Santo Angelo : Guarulhos. 1999.
17. WIDMANN, U. Three application examples for sound quality desing using psychoacoustic tools. Acustica, Vol. 83. pg 819-826. 1997.

ANEXO 1

OFFICIAL SOUND JURY BALLOT

NAME _____

DATE _____

NOTE: 'SOUND' is typically expected and is not always undesirable;
'NOISE' is always unwanted !

| <u>Grade</u> | <u>Definition</u> |
|--------------|--|
| 0.0 | NO DETECTABLE SOUND |
| 0.5 | JUST PERCEIVABLE SOUND |
| 1.0 | VERY QUIET SOUND LEVEL: No complaints anticipated |
| 1.5 | QUIET SOUND LEVEL: Very few complaints anticipated |
| 2.0 | SLIGHTLY NOISY: Some complaints anticipated |
| 2.5 | NOISY: Complaints would be expected |
| 3.0 | VERY NOISY: Large number of complaints anticipated |
| 3.5 | EXTREMELY NOISY; VERY ANNOYING NOISE LEVEL: Excessive complaints |
| 4.0 | INTOLERABLE NOISE LEVEL: Cabinet would be returned due to noise |

| CABINET I.D. # | RATING | COMMENTS: START-UP | COMMENTS: STEADY STATE | COMMENTS: SHUT-DOWN |
|-------------------|--------|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

WORDS COMMONLY USED TO DESCRIBE SOUNDS

| | | | | |
|---------|----------|----------|---------|---------|
| BUZZ | CREAK | HUM | RUMBLE | TAP |
| CLACK | DRIP | KNOCK | RUSHING | THROB |
| CLANG | DRUMMING | PATTER | SCREECH | THUD |
| CLANK | FIZZ | PING | SHRILL | THUMP |
| CLAP | GLUG | POP | SIZZLE | TICK |
| CLATTER | GNASHING | PULSING | SLAP | TINKLE |
| CLICK | GRATING | PURR | SNAP | TING |
| CLINK | GRINDING | RAP | SPLASH | TWANG |
| CLUNK | GRUMBLE | RATTLE | SPUTTER | WHEEZE |
| CRACK | GURGLE | RING | SQUEAK | WHINE |
| CRACKLE | HISS | RIPPLING | SQUEAL | WHIRL |
| | | ROAR | SWISH | WHISTLE |

ANEXO 2

IDENTIFICAÇÃO:

Nº: _____

- a. Idade: _____
- b. Sexo: Masculino Feminino
- c. Estado civil: Solteiro Casado Viúvo Separado Vive maritalmente
- d. Número de filhos: _____
- d. Renda Familiar: _____
- e. Grau de escolaridade: 2º grau 2º grau Técnico Superior incompleto
 Superior Pós-graduado
- f. Apresenta algum tipo de problema auditivo Não Sim Descreva-o: _____

QUESTIONÁRIO PARA AVALIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO AO RUÍDO

1. Quais os ruídos a que fica exposto no local onde mora (nos horários em que se encontra em casa):

- Trânsito de veículos:
- Movimento de pessoas:
- É próximo de fábrica ou casa de shows que apresentam alto nível de ruído
- Som de rádio ou TV precisam ficar altos para serem ouvidos

Como você classificaria o ruído da região onde mora:

- agradável aceitável inaceitável

Existe algum ruído em especial que lhe incomode no local onde mora, descreva-o:

2. Quais os ruídos a que fica exposto no local onde trabalha(nos horários em que se encontra no trabalho):

- Local ruidoso ou próximo a um, usando protetor auricular
- Local ruidoso ou próximo a um, sem protetor auricular
- Local pouco ruidoso
- Considera-se habituado ao ruído a que é exposto
- O seu nível de stress no trabalho é acima da média
- Ruído típico de escritórios (ar condicionado, digitação, pessoas conversando,...)

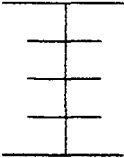
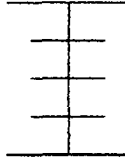

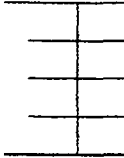
Como você classificaria o ruído do local onde trabalha:

- normal aceitável inaceitável

Descreva o tipo de ruído a que fica exposto no seu trabalho (se industrial qual o tipo de equipamento, ruído de escritório, tráfego de veículos,...), e caso haja algum ruído em especial que o desagrade descreva-o:

Avalie os ruídos que serão apresentados, assinalando com um traço, na escala o quanto são incômodos ou não:

Grupo 01

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Desagradável | Desagradável | Desagradável | Desagradável |
|  |  |  |  |
| Agradável | Agradável | Agradável | Agradável |

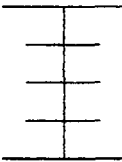
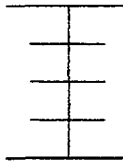
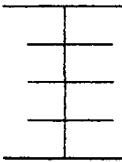

Assinale as características que mais se destacaram nos sinais: (o mesmo sinal pode apresentar mais de uma característica)

- a) É agudo, um som fino, semelhante a um chiado de chaleira ou o ruído de uma serra elétrica
 1 2 3 4
- b) É grave, um som grosso, semelhante ao som de uma tuba
 1 2 3 4
- c) Apresenta uma pulsação / flutuação, como uma sirene de ambulância (modulação)
 1 2 3 4
- d) Apresenta algum tom puro, como o som de teste no início de filmes em vídeo
 1 2 3 4

Alguma destas características lhe desagrada em especial?

Caso deseje fazer mais algum comentário faça-o abaixo:

Grupo 02

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Desagradável | Desagradável | Desagradável | Desagradável |
|  |  |  |  |
| Agradável | Agradável | Agradável | Agradável |

Assinale as características que mais se destacaram nos sinais: (o mesmo sinal pode apresentar mais de uma característica)

- a) É agudo, um som fino, semelhante a um chiado de chaleira ou o ruído de uma serra elétrica
 1 2 3 4
- b) É grave, um som grosso, semelhante ao som de uma tuba
 1 2 3 4
- c) Apresenta uma pulsação / flutuação, como uma sirene de ambulância (modulação)
 1 2 3 4
- d) Apresenta algum tom puro, como o som de teste no início de filmes em vídeo
 1 2 3 4

Alguma destas características lhe desagrada em especial?

Caso deseje fazer mais algum comentário faça-o abaixo:

Em relação ao teste quais foram as suas impressões:

- O ruído apresentado estava num bom nível para a avaliação ? O tempo de apresentação foi suficiente para a percepção do ruído, ou foi longo demais ?

- O tempo entre os sinais na apresentação foi bom, ou deveria ser maior / menor ?

- Quanto ao número de ruídos apresentados em cada grupo, foi possível realizar uma boa avaliação?

- E quanto a quantidade de grupos, foram excessivos?

- O questionário inicial fornece um bom perfil quanto ao avaliador? Você tem alguma sugestão quanto mais alguma questão?

- Após o término do teste sentiu-se cansado ou nervoso pela exposição ao ruído ?

- Sentiu-se confortável com o headphone ? E quanto ao local da apresentação, sentiu-se confortável durante a mesma?

- A escala utilizada para avaliar os ruídos foi eficiente? Tem alguma sugestão para modificação?

Anexo 3

A. Gráficos de “loudness” dos compressores com escalas em Hz.

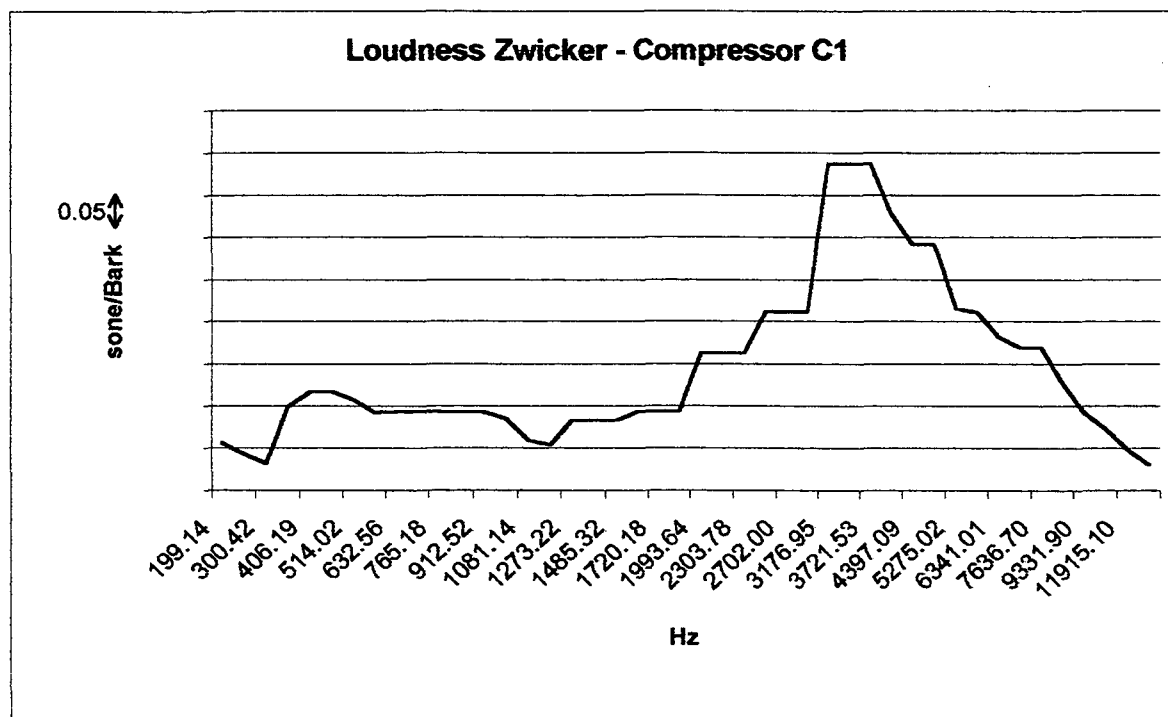


Figura 01 – “Loudness” Zwicker do compressor C1

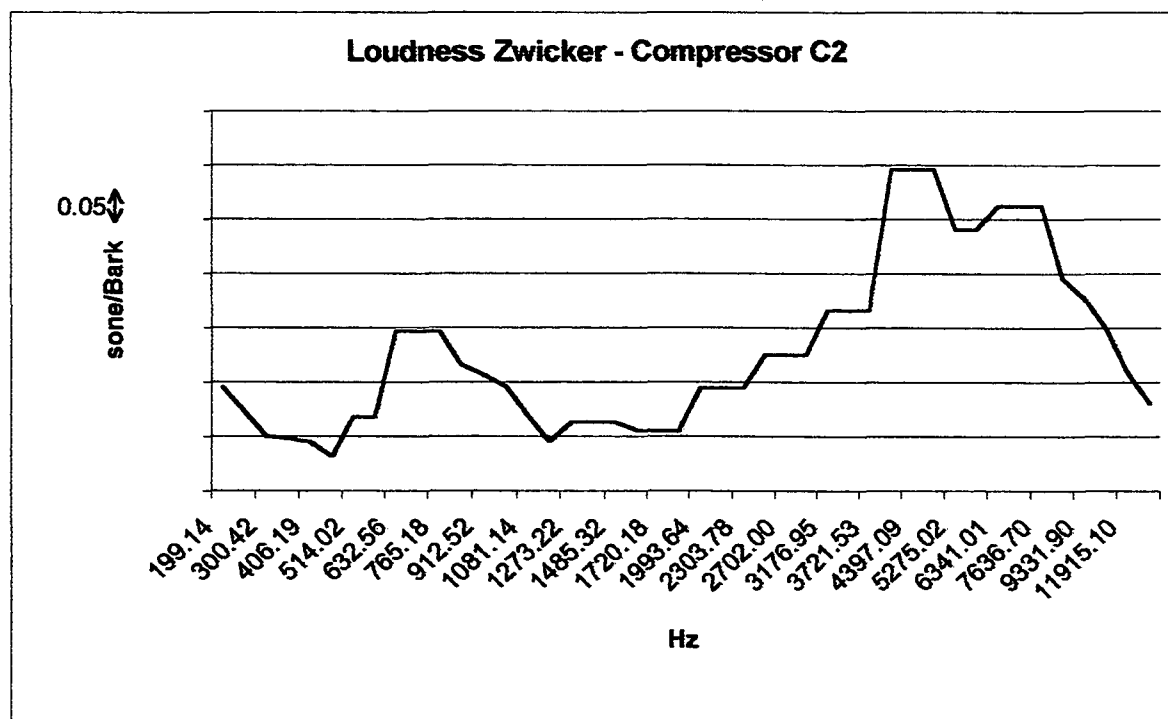


Figura 02 – “Loudness” Zwicker do compressor C2

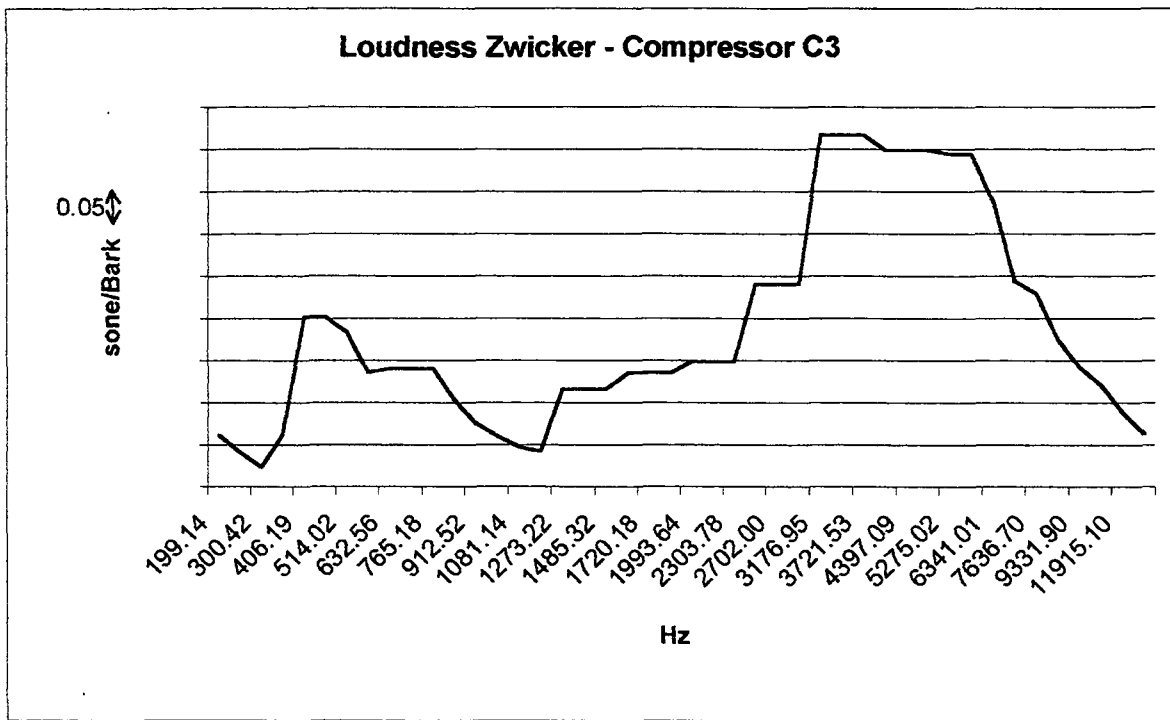


Figura 03 – “Loudness” Zwicker do compressor C3

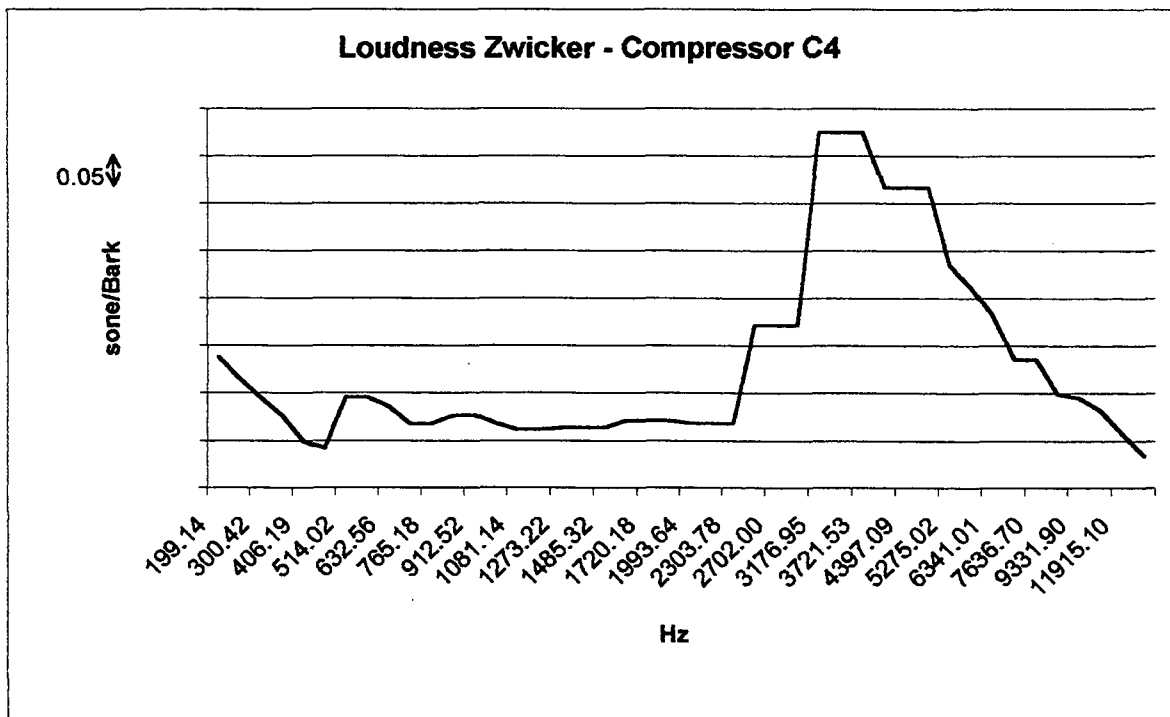


Figura 04 – “Loudness” Zwicker do compressor C4

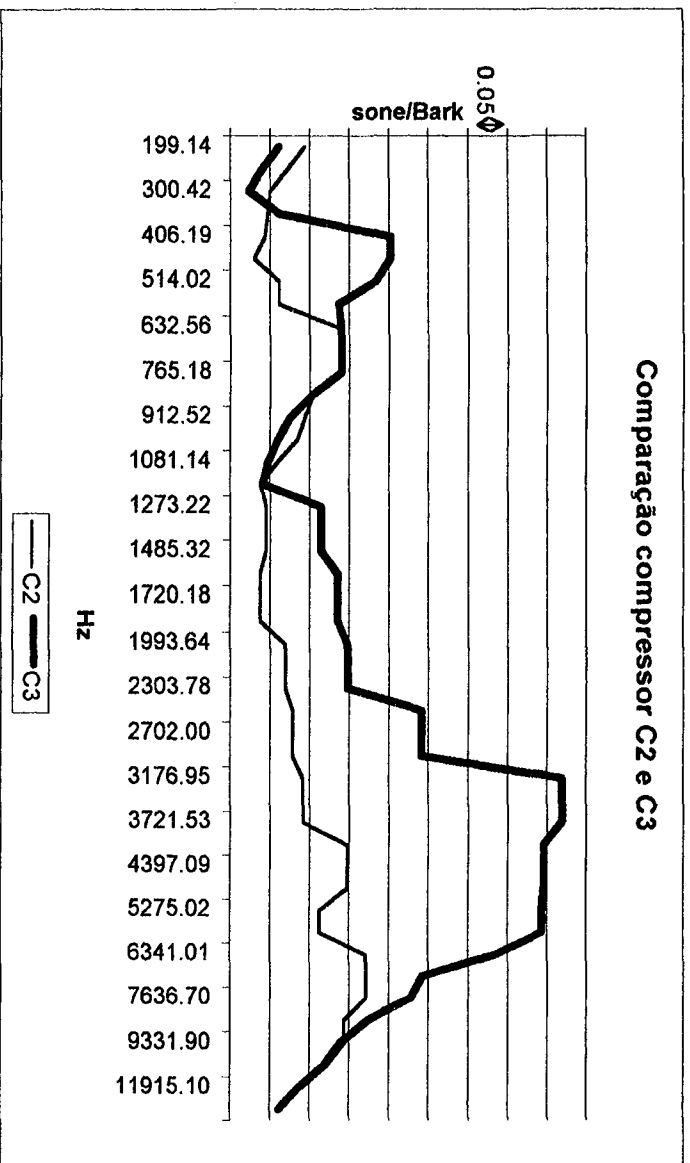


Figura 05 – “Loudness” Zwicker do compressor C2 e C3

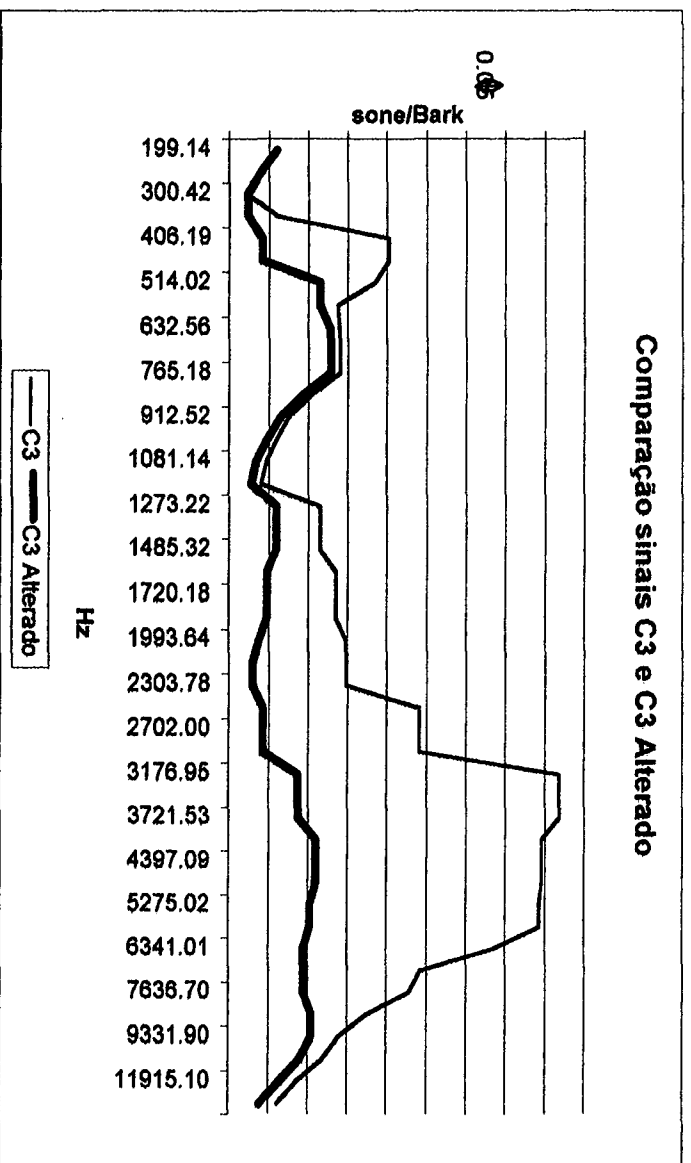


Figura 06 – “Loudness” Zwicker do compressor C3 e C3 alterado

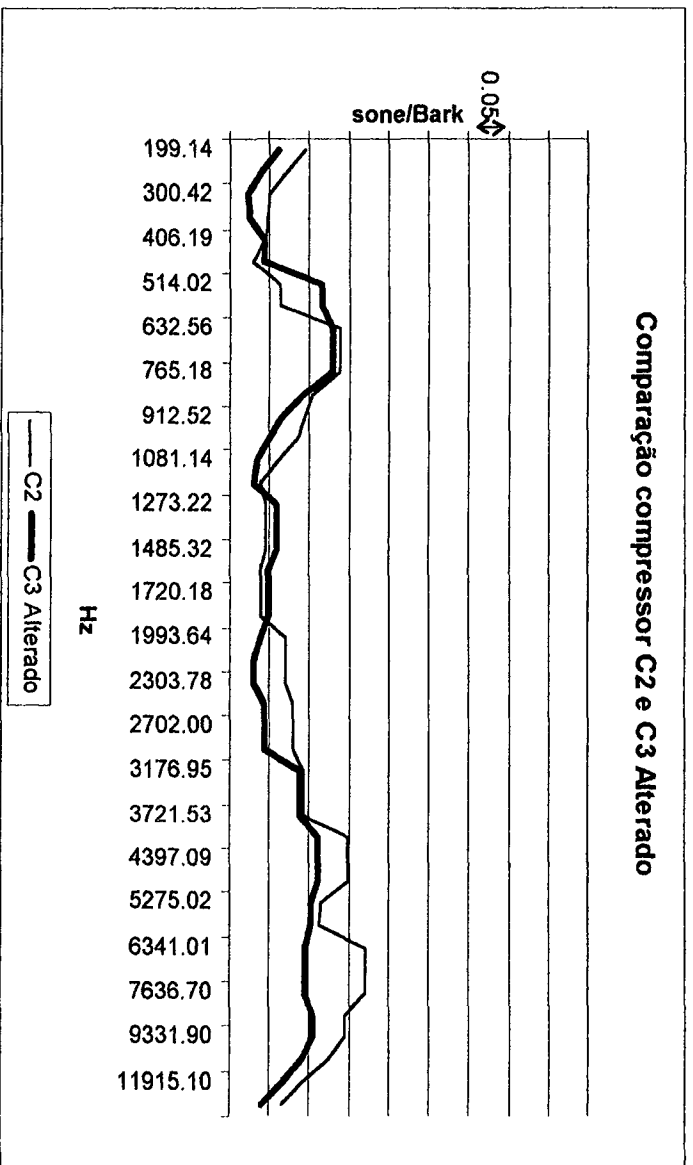


Figura 07 – “Loudness” Zwicker do compressor C2 e C3 alterado

B. Gráficos de “loudness” dos sistemas de refrigeração com escalas em Hz.

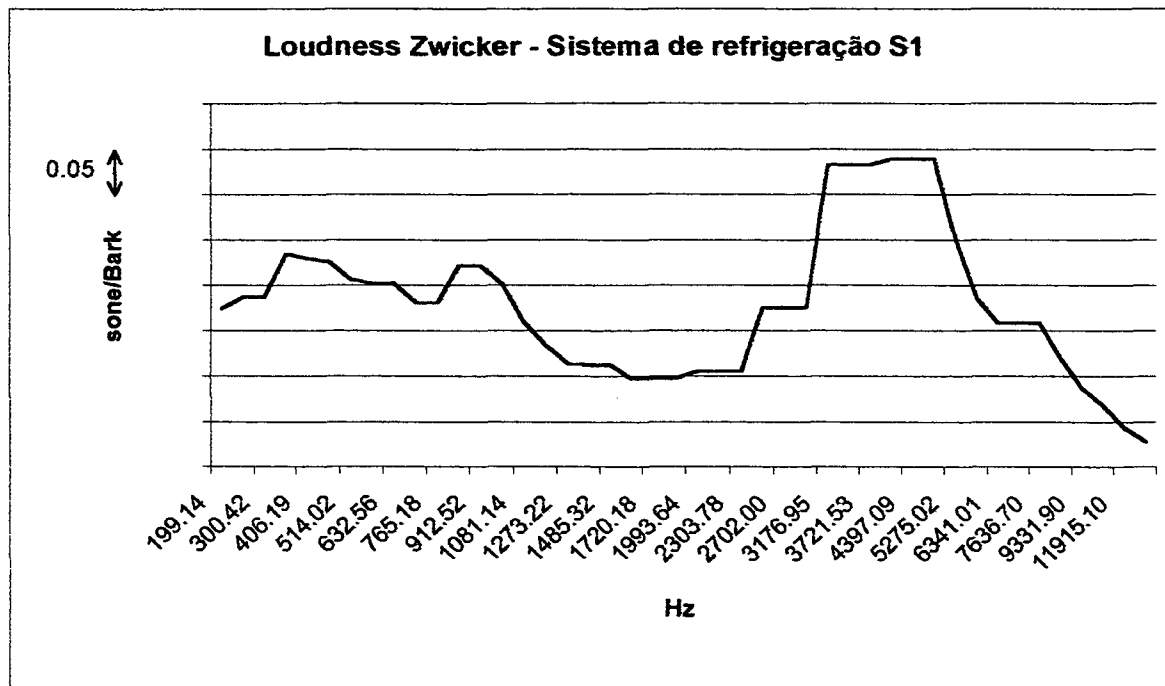


Figura 08 – “Loudness” Zwicker do sistema S1

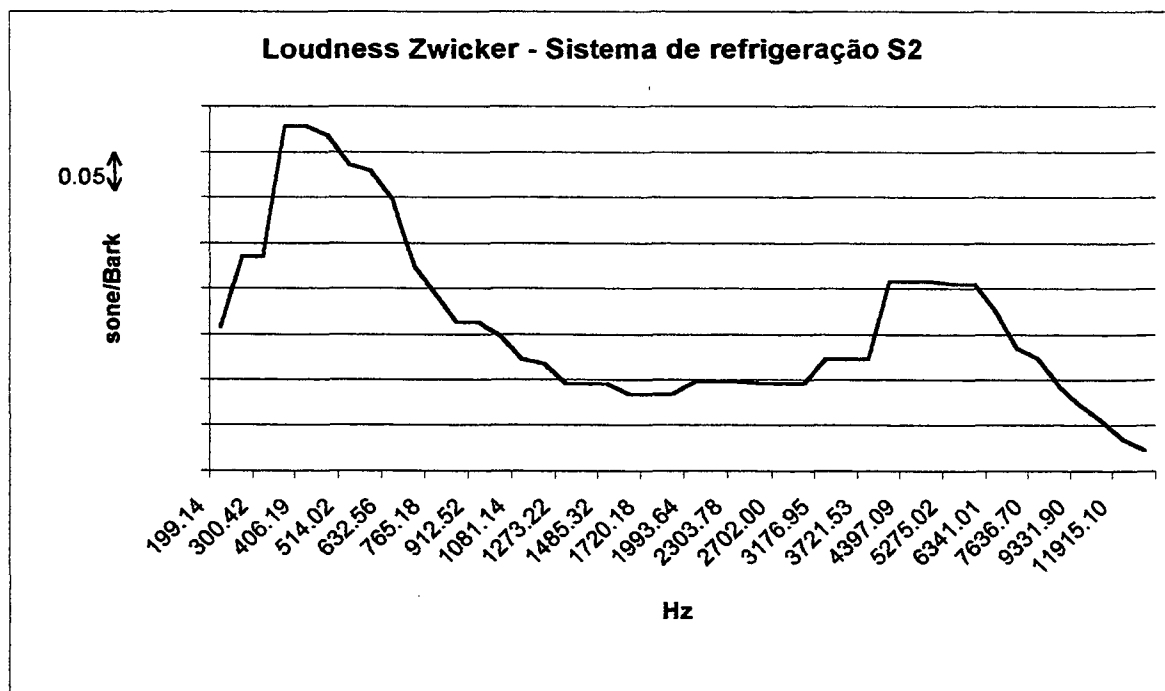


Figura 09 – “Loudness” Zwicker do sistema S2

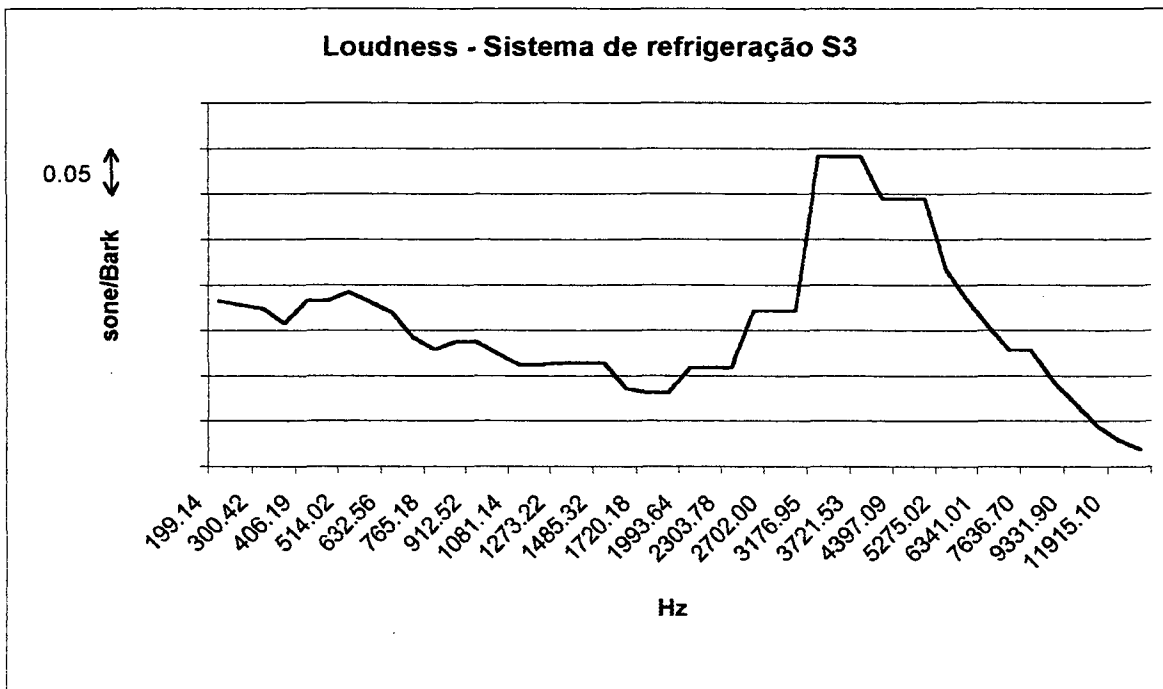


Figura 10 – “Loudness” Zwicker do sistema S3

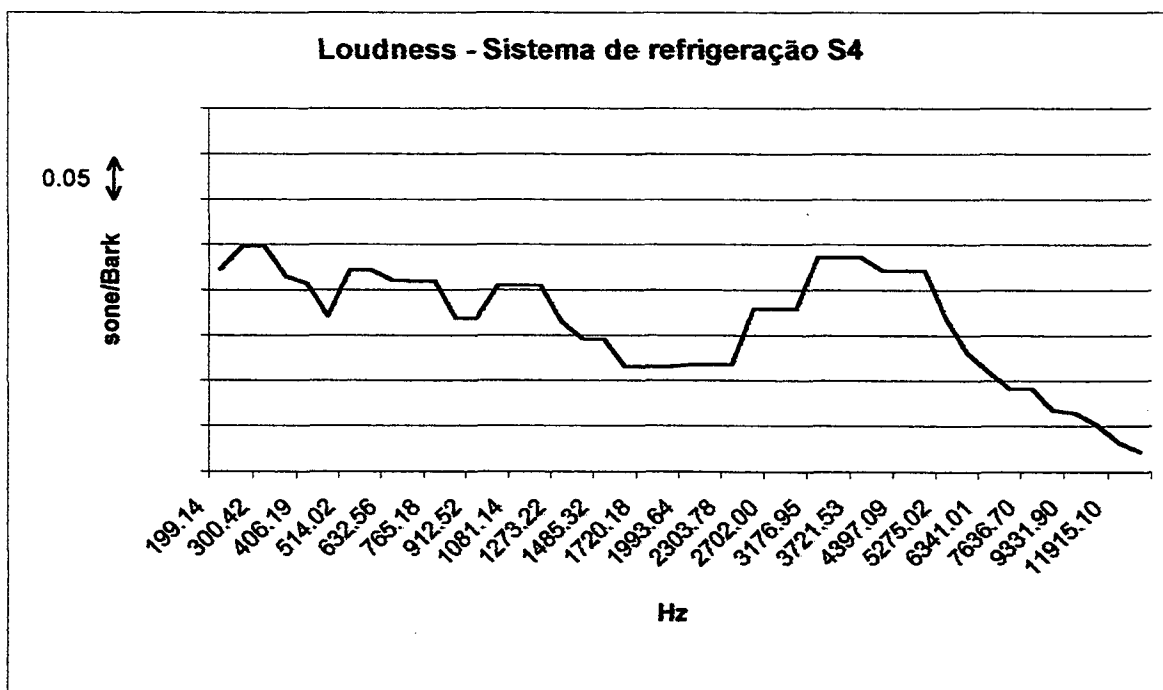


Figura 11 – “Loudness” Zwicker do sistema S4

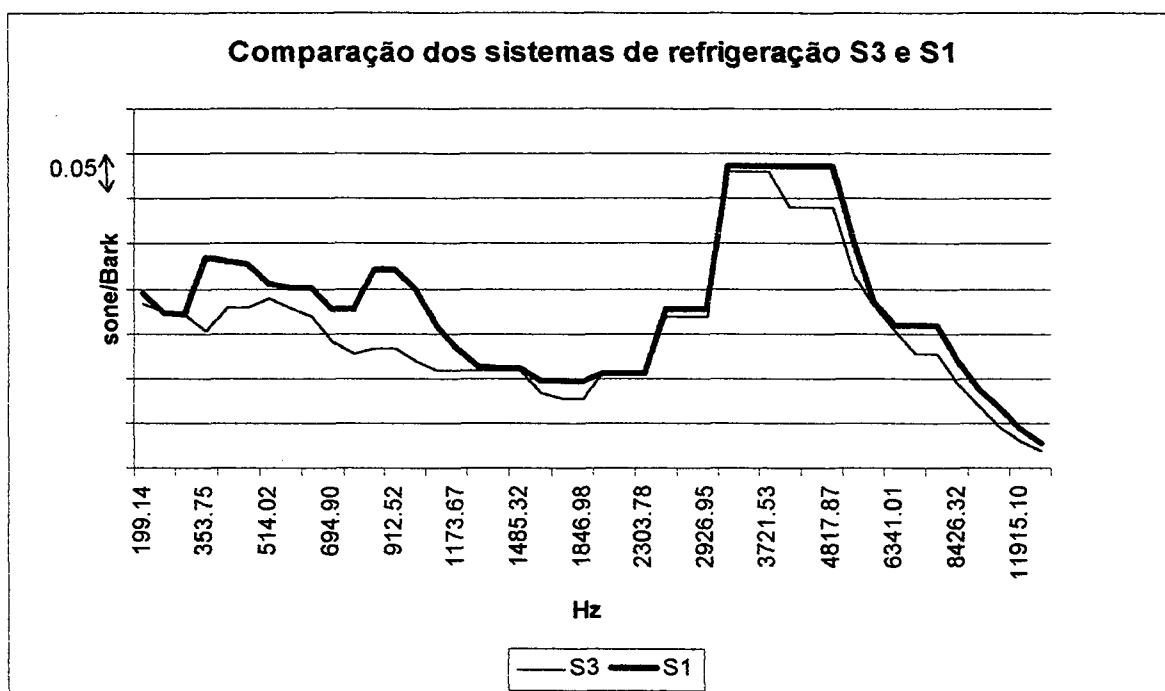


Figura 12 – “Loudness” Zwicker do sistema S3 e S1

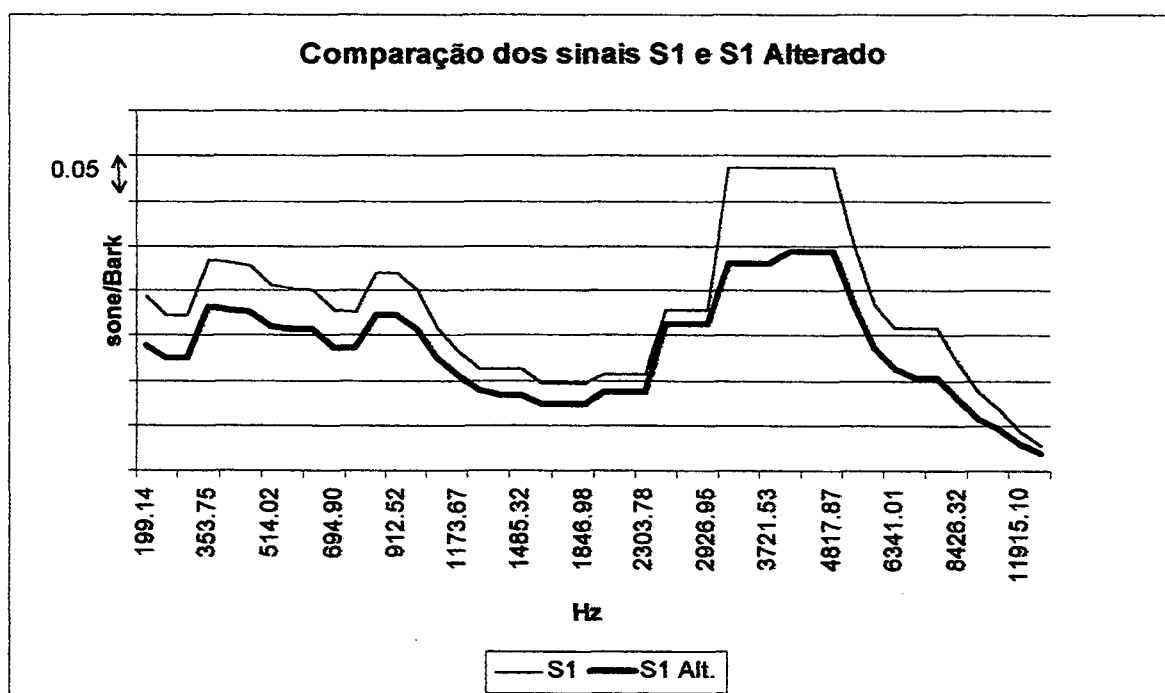


Figura 13 – “Loudness” Zwicker do sistema S1 e S1 Alterado

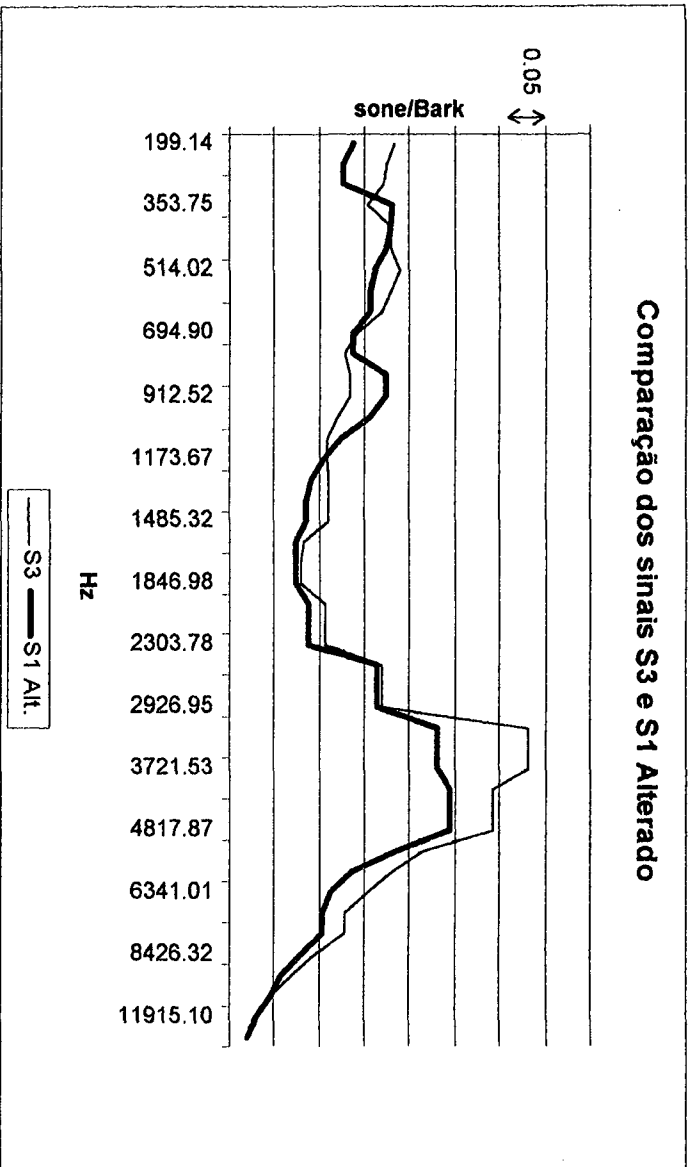


Figura 14 – “Loudness” Zwicker do sistema S3 e S1 Alterado