

MATEUS RUIZ VAZ GOMEZ

ENSAIO SOBRE AUDIBILIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de
Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues

São Carlos
2009

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| Agradecimentos..... | 5 |
| Resumo..... | 7 |
| Abstract..... | 9 |
| 1. Introdução..... | 11 |
| 2. Objetivos..... | 13 |
| 3. Contexto Teórico..... | 15 |
| 3.1. <i>Resumo da Postura Subjetivista</i> | 15 |
| 3.2. <i>Breve Histórico</i> | 17 |
| 3.3. <i>As Limitações do Sistema Auditivo</i> | 17 |
| 3.4. <i>Alguns Postulados</i> | 21 |
| 3.5. <i>O Comprimento da Cadeia de Áudio</i> | 26 |
| 3.6. <i>As Conseqüências</i> | 27 |
| 3.7. <i>Os Porquês</i> | 28 |
| 3.8. <i>A Perspectiva</i> | 29 |
| 3.9. <i>Erros Técnicos</i> | 29 |
| 4. Discussão..... | 31 |
| 4.1. <i>Audibilidade da Distorção</i> | 31 |
| 4.1.1. <i>Reações Subjetivas</i> | 31 |
| 4.1.2. <i>Sistemas de Gravação e Amplificadores</i> | 32 |
| 4.1.3. <i>Uma Ferramenta no Diagnóstico</i> | 34 |
| 4.1.4. <i>Revisões de Amplificadores</i> | 36 |
| 4.1.5. <i>Conclusões Parciais</i> | 37 |
| 4.2. <i>Níveis de Distorção Detectáveis</i> | 39 |
| 4.2.1. <i>Contexto dos Padrões de Mensuração</i> | 39 |
| 4.2.2. <i>Mapeamento das Variáveis</i> | 40 |
| 4.2.3. <i>Evolução das Padronizações</i> | 44 |
| 4.2.4. <i>Revisitação dos Experimentos</i> | 45 |
| 4.2.5. <i>Conclusões Parciais</i> | 47 |
| 4.3. <i>Medição de Ruído Elétrico</i> | 49 |
| 4.3.1. <i>Relação Sensibilidade/Freqüência do Sistema Auditivo</i> | 49 |
| 4.3.2. <i>Resposta dos Transdutores</i> | 51 |
| 4.3.3. <i>Efeitos Mascaradores</i> | 52 |
| 4.3.4. <i>Ruído Intermitente</i> | 52 |
| 4.3.5. <i>Curvas de Ponderação</i> | 53 |
| 4.3.6. <i>Características de Medição</i> | 53 |
| 4.3.7. <i>Conclusões Parciais</i> | 55 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4. Deslocamentos de Fase em Alto Falantes..... | 56 |
| 4.4.1. Primeiras Impressões em Qualidade Sonora..... | 56 |
| 4.4.2. Formas de Onda Artificiais..... | 57 |
| 4.4.3. Vales de Interferência..... | 58 |
| 4.4.4. Limites do Fator de Qualidade..... | 59 |
| 4.4.5. Formação da Imagem Estereofônica..... | 61 |
| 4.4.6. Conclusões Parciais..... | 63 |
| 5. Conclusões..... | 65 |
| 6. Apêndice..... | 67 |
| <i>Carta Sobre Padrões de Medição Desenvolvidos por Fabricantes.....</i> | <i>67</i> |
| 7. Referências Bibliográficas..... | 69 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 3.3.1. Base da intermodulação de <i>Belcher</i> | 19 |
| 3.3.2. Montagem para a medição da distorção harmônica total a baixos níveis..... | 20 |
| 3.4.1. Amplificador estéreo de alta fidelidade residencial comercializado pela empresa brasileira Pedrone Amplificadores Valvulados & Eletrônica..... | 23 |
| 3.4.2. Técnica de cancelamento de <i>Baxandall</i> | 26 |
| 3.4.3. Teste diferencial de fio reto de <i>Hafler</i> | 26 |
| 4.1.3.1. Montagem de diagnóstico de <i>Baxandall</i> | 34 |
| 4.2.2.1. Ilustração das largas variações de nível do sinal de áudio durante um minuto de execução da música “ <i>Molly on the Shore</i> ”, de <i>Percy Grainger</i> | 40 |
| 4.2.2.2. Distorção percentual por nível sonoro em alto falante e amplificador de oito entradas típicos..... | 41 |
| 4.2.2.3. Distorção detectável por duração de pulso para rajadas senoidais a 1kHz..... | 42 |
| 4.2.4.1. Estudo da distorção de cruzamento a partir de um analisador de banda fina..... | 46 |
| 4.3.1.1. Curvas de volume de <i>Robinson e Dadson</i> | 50 |
| 4.3.1.2. Curvas de ponderação A, B e C..... | 50 |
| 4.3.2.1. Curva de ponderações típica definida pela CCIT..... | 51 |
| 4.3.2.2. Espectro de freqüências típico do ruído branco..... | 52 |
| 4.3.5.1. Curva de ponderações dada pela recomendação 468 da IEC..... | 53 |
| 4.4.1.1. Curva de resposta fase/freqüência absoluta do filtro passa-tudo usado no experimento..... | 57 |
| 4.4.3.1. Curva de resposta amplitude/freqüência do circuito do experimento de <i>Hill</i> | 59 |
| 4.4.4.1. (a) Curva de resposta fase/freqüência do falante monitor tipo LS5/5 e (b) resposta em fase do sistema com um atraso de 0,25 ms..... | 60 |
| 4.4.4.2. Correspondência entre o atraso de tempo axial e a freqüência no alto falante do tipo LS5/5..... | 61 |

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- MPH – Milhas por hora;
- MPG – Milhas por galão;
- MPIS – Milhões de instruções por segundo;
- THD – Distorção harmônica total;
- JDD – Distorção realmente detectável;
- SNNR – Signal plus noise/noise ratio;
- CCIT – Comitê Consultivo de Telefonia e Telegrafia Internacional;
- AES – Sociedade de Engenharia de Áudio;
- CCIR – *Comité Consultatif International pour la Radio.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu orientador, o professor Evandro Luis Linhari Rodrigues, pelo apoio que recebi no desenvolvimento deste escrito mesmo após mudar seu escopo, passando a uma abordagem menos usual. Um Trabalho de Conclusão de Curso, para além da contribuição científica, tem seu propósito didático e dificilmente encontraria alguém com mais clareza do papel de um docente nessa etapa final da graduação.

RESUMO

Fora do ramo principal das atividades de engenharia, os produtos da indústria de áudio, em vez de atenderem a necessidades ou simplificarem trabalhos cotidianos, dispõem-se para gerar prazer a seus consumidores. Não bastasse a complexidade maior, a resposta real de um sistema (a percepção do ouvinte) está longe de apenas refletir a tensão de saída do amplificador ou a pressão acústica gerada pelos alto falantes: é necessário ao projetista dominar e considerar corretamente as nuances do aparelho auditivo, ponderando dentre os aprimoramentos convencionais sobre o sinal elétrico o que é de fato uma melhoria de qualidade no dispositivo. Embora seja talvez trivial esperar uma postura assim daqueles dispostos a contribuir para o desenvolvimento desse ramo científico, a literatura especializada comumente trata em separado os refinamentos no sinal de saída e as melhorias audíveis no desempenho. Considerando tais linhas indissociáveis, este trabalho propõe uma compilação crítica das informações, com a certeza de que um guia nesse formato dará o embasamento necessário a uma visão mais ampla da função do engenheiro dentro do setor de áudio.

Palavras-chave: audibilidade, psicoacústica, amplificadores, falantes, ruído, *reviews*.

ABSTRACT

Outside the main branch of the engineering developments, the audio industry's products, instead of attending needs or simplifying quotidian works, dispose themselves to give pleasure to the consumers. Wasn't the bigger complexity enough, the real system response (the listener's perception) is far from only reflecting the output voltage of the amplifier or the acoustic pressure generated by the loudspeakers: it is necessary for the designer to be fluent and consider correctly the nuances of the hearing system, weighing among the conventional electrical signal improvements what's really an enhancement over the apparatus quality. Although it's maybe trite to presume such a posture from those willing to contribute to the development of this scientific branch, specialized literature usually handles separately the output signal's refinements and the audible advances on the system's performance. Considering these lines indissociable, this paper intends to critically compile the informations, being sure that a guide in such shape will give the necessary support to a wider view of the engineer's role in the audio sector.

Keywords: audibility, psychoacoustics, amplifiers, speakers, noise, reviews.

1. INTRODUÇÃO

Este não é um trabalho de conclusão de curso convencional, ao menos nos padrões do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos. Em vez da implementação científica usual, com cálculos, simulações e leituras de desempenho, a proposta é, em cima das singularidades da indústria de áudio, estudar e expor seu real contexto: uma análise que, para além de uma lacuna na literatura, traz sérias conseqüências à formação do projetista aspirante – retardando seu amadurecimento ou mesmo debilitando-o.

Embora tenham sua qualidade definida pela interação humana, os produtos desse setor são avaliados majoritariamente por indicadores generalistas que, extraídos do estudo de sinais elétricos, não têm correlação com a resposta do sistema auditivo, falhando ao avaliar o comportamento do aparato. Tal falta de clareza estende seus impactos do enfoque em aprimoramentos vãos à divulgação destes como melhorias sonoras aos consumidores.

A Inglaterra dos anos setenta (de indústrias tradicionais de áudio e boa estrutura de imprensa) talvez tenha sido o berço dessas disseminações mal embasadas por periódicos especializados; mas, com seus excelentes centros de pesquisa em engenharia, foi certamente a principal fonte de esclarecimentos técnicos, responsável não apenas pelo desenvolvimento de novas topologias como principalmente por grandes avanços na qualificação objetiva do desempenho de equipamentos.

Pela impossibilidade de demonstrar em bancada os pontos defendidos, consideram-se as publicações que o Departamento de Pesquisas da BBC comumente autorizava em revistas como a *Wireless World*, escritos de mais de trinta anos que ainda são referência, por exemplo, na edição de 2006 do *The Audio Power Amplifier Design Handbook*¹, do inglês *Douglas Self*, indicativo da relevância dessas conclusões – assumindo tais resultados verdadeiros, concentram-se esforços sobre sua interpretação em vez de uma revisita criteriosa dos experimentos originais.

Reduzir a distorção harmônica total em amplificadores é ponto de pauta comum no desenvolvimento deles e, partindo dos estudos de *Peter J. Baxandall*³, será discutida a relevância real desse percentual, apresentando também seus famosos testes de subtração, estrutura que permite isolar as deformações do sistema em uma análise subjetiva dos resultados (monitoramento pela saída de um alto falante).

Na seqüência consideram-se os esforços de *James Moir* para definir o nível detectável de distorção, mostrando (junto às análises de outros pesquisadores) as diversas variáveis envolvidas na percepção auditiva e seus padrões científicos de mensuração, indo além de apenas expor a

insuficiência de um único número. Como apêndice, é citada uma carta sua mostrando insatisfação com a influência de interesses corporativos no estabelecimento de medidas de desempenho.

Tendo claros o contexto dos amplificadores e os problemas e perspectivas de uma extração de dados coerente com a percepção subjetiva do sinal sonoro, debruça-se a análise sobre os únicos elementos da cadeia em que as respostas em fase e frequência não têm forte correspondência: os alto falantes. Instigado por fabricantes que linearizaram a relação fase/frequência alegando melhorias audíveis, *H. D. Harwood*⁹ conduziu uma série de experimentos para mostrar a falta de evidências por trás dos supostos avanços. Completando o estudo desse estágio transdutor, é discutida a formação da imagem estereofônica, campo que à primeira vista parece ser afetado pela fase do sinal.

Esta análise não se aprofunda nas tecnologias digitais, que (com princípios operacionais completamente distintos aos das etapas de amplificação) não apresentam a plena maturidade da esfera analógica, sendo necessárias justamente as criteriosas montagens em bancada que seriam inviáveis dentro da estrutura disponível para um Trabalho de Conclusão de Curso.

O desempenho ideal obtido há tantos anos, por outro lado, está longe de ter, entre confiabilidade dos circuitos, componentes utilizados e automação da manufatura, os baixos custos de produção necessários para garantir que uma parcela maior da população tenha acesso a essa perfeição. O custo por unidade de potência caiu com o passar do tempo, mas a comparação com outros segmentos da indústria mostra a defasagem da área de áudio dentro da recente popularização da eletrônica – restringem-se ainda os melhores produtos a um setor *high end* (em que, por ironia, diversos conceitos alquímicos são comumente validados por quem julga ter a audição mais refinada).

2. OBJETIVOS

Grandes avanços da engenharia são comumente inadequados à produção em massa (algo que, por si só, já demanda mais desenvolvimento); na ciência de áudio essas melhorias de desempenho concentram-se no setor *high end* da indústria, de custos distantes à maior parte da população. Defendendo que já foi alcançado o desempenho elétrico ideal em amplificadores de alta fidelidade, que nenhum refinamento na resposta trará melhorias perceptíveis aos usuários, pretendem-se apontar as reais necessidades de avanço: aprimorar a confiabilidade dos circuitos, permitindo sua implementação em larga escala e, assim, que uma parcela cada vez maior possa usufruir desse progresso tecnológico.

Não se faz aqui uma crítica à indústria contemporânea, não há evidências que indiquem ingenuidade e nem mesmo má fé da maioria dos fabricantes; mas é pela ausência na literatura de uma contextualização assim que esta abordagem, apresentando uma postura usualmente desenvolvida após leituras extensas e dispersas, preenche uma profunda lacuna na formação do engenheiro de áudio.

3. CONTEXTO TEÓRICO

Na quarta edição de seu livro *The Audio Power Amplifier Design Handbook*¹, o inglês *Douglas Self* destaca a posição singular em que se encontra a engenharia de áudio: poucas ramificações das ciências exatas estão partidas de cima a baixo por uma divisão tão básica quanto a dicotomia subjetivista/racionalista. O subjetivismo é ainda bastante influente no setor de alta fidelidade da indústria, mas tem feito poucos avanços sobre o áudio profissional, em que um conhecimento íntimo da sonoridade original e a necessidade de ganhar a vida com equipamentos confiáveis e compráveis são uma barreira eficiente contra a maioria dessas influências irracionais.

Os campos de tecnologia, em sua esmagadora maioria, definem e aceitam medidas de excelência: fabricantes de carros competem por melhorias em seus MPH (*miles per hour*) e MPG (*miles per gallon*), os de computadores maximizam os MIPS (*millions of instructions per second*). Aprimoramentos nesses índices são tidos inequivocamente como um passo à frente; na esfera da alta fidelidade, parece haver certa dificuldade em dizer qual direção é adiante.

Trabalhando como projetista profissional, *Douglas Self* cita opiniões que, ouvidas muitas vezes sem surpresa no campo do *hi-fi*, são tidas como ridículas por membros de outras áreas da engenharia elétrica. Projetistas aspirantes são desestimulados pela fama de que o áudio não está muito longe da bruxaria e de que ninguém sabe realmente o que está fazendo. Cita também o senso comum subjetivista de que a operação do ouvido humano é tão complexa que sua interação com parâmetros mensuráveis está muito além da compreensão humana – trata-a, entretanto, como uma posição extrema, acrescentando que é posta mais como declaração plana do que ponto de partida para discussão.

3.1. Resumo da Postura Subjetivista

Os pontos abaixo listam brevemente a posição subjetivista acerca principalmente dos amplificadores de potência¹:

- medidas objetivas do desempenho são irrelevantes comparadas às impressões subjetivas extraídas de audições informais (resultados objetivos deverão ser dispensados caso elas se contradigam);
- existem efeitos de degradação desconhecidos à engenharia ortodoxa, que não são revelados por testes objetivos convencionais;

- uma latitude considerável poderá ser usada na sugestão de mecanismos hipotéticos de debilitação acústica (como misteriosas deficiências capacitivas e sutis defeitos de cabeamento) sem nenhuma referência à plausibilidade do conceito nem à reunião de evidências objetivas de qualquer espécie.

Enquanto isso, a grande maioria do público pagante continua a comprar sistemas de alta fidelidade convencionais, ignorando o dispendioso e exotérico setor de alto nível, onde o debate é mais feroz. Causa estranheza que uma parte considerável da indústria tenha virado suas atenções em um rumo tão contrário aos fatos. Essa perda de direção em uma temática científica parece irreversível, mas as coisas não são assim tão graves.

Entre outros eventos auto-sugestivos estão a destruição do estudo da genética em *Lysenko*, na União Soviética, e o estudo da parapsicologia (em sérios apuros por, após cem anos de investigação, ainda não ter descoberto o fantasma de um fenômeno reprodutível). Soa tudo bem familiar: a última talvez seja uma analogia pobre, pois a maioria das pessoas aceita que em primeiro lugar não haja nada a ser estudado, enquanto ninguém afirmaria que medidas objetivas e qualidade acústica subjetiva não têm nenhuma correlação – basta pegar o telefone para lembrar como soam uma largura de faixa de 4 kHz e cerca de 10% de distorção harmônica total.

Um exemplo interessante na história da ciência é o caso quase esquecido entre a Academia Francesa e os raios N^2 . Em 1903, *René Blondot*, um respeitado físico francês, disse ter descoberto uma nova forma de radiação, que chamou raios *N* (isso pouco após a descoberta dos raios *X* por Roentgen). Tal emissão era misteriosamente refratada por prismas de alumínio, mas o crucial era que sua presença podia apenas ser demonstrada pelo estudo subjetivo do brilho de um arco supostamente afetado por essas ondas eletromagnéticas. Nenhuma medição objetiva parecia possível, mas, para *Blondot* e ao menos quatorze de seus colegas profissionais, os efeitos eram reais; e a Academia Francesa publicou mais de uma centena de artigos sobre o assunto.

Infelizmente, era tudo imaginário, fruto de um fenômeno conhecido na psicologia como expectativa do experimentador. O cientista americano *Robert Wood* secretamente guardou em seu bolso um prisma de alumínio durante uma demonstração sem afetar em nada os resultados de *Blondot*. A indústria dos raios *N* colapsou rapidamente e, embora tenha sido uma situação muito embaraçosa na época, hoje ela está quase esquecida. É perfeitamente possível uma grande quantidade de pessoas sinceras enganarem a si mesmas na avaliação sem critério de um determinado efeito.

3.2. Breve Histórico

Na curta história da reprodução sonora é notável o número de vezes em que seus observadores reportaram que um gramofone acústico deu resultados indistintos à realidade (a mera existência de tais colocações põe luz em como impressões subjetivas são afetadas por vincos mentais). Tal interesse intensificou-se no período pós-guerra, sendo definidos padrões técnicos como o DIN 45-500, rapidamente criticados pelo pouco rigor. No final dos anos sessenta, aceitava-se largamente que os requisitos para a alta fidelidade seriam satisfeitos por uma “distorção harmônica total abaixo de 0,1%, sem distorção de cruzamento significativa, com resposta em frequência entre 20 Hz e 20 kHz e tão pouco ruído quanto possível”. O começo da década de setenta viu a inclusão das taxas de variação e das proteções contra sobrecarga, mas sempre com uma abordagem científica: eram comuns resenhas de amplificadores nas quais as medidas eram dissecadas sem qualquer menção a testes auditivos.

O desenrolar do subjetivismo através páginas de uma de suas mais expressivas revistas, a *Hi-Fi News*, debutou na coluna de *Paul Messenger*, a *Subjective Sounds*, em setembro de 1976, na qual disse: “a análise será feita de forma (quase) puramente subjetiva, o que tem seus pontos fortes e fracos; visto que a inclusão de dados de laboratório tomaria muito tempo e espaço, embora o ouvido possa ser mais falho, é também o instrumento mais sensível de avaliação”. Significativamente, nenhuma das publicações anteriores tinha referências à sonoridade do amplificador; em março de 1977, *Jean Hiraga* levou a público um artigo vilipendiando altos níveis de realimentação negativa e louvando o som de um amplificador com 2% de distorção harmônica total e, ainda nesse tema, *Paul Messenger* declarou que a sonoridade de um valvulado *Radford*® estava acima da de qualquer transistorizado. *Hiraga* voltou em agosto de 1977 com uma série de afirmações sobre a audibilidade de cabos de falantes – depois disso nenhuma hipótese era inverossímil demais para não receber atenção.

3.3. As Limitações do Sistema Auditivo

Propondo um estudo de audibilidade, é essencial considerar as habilidades conhecidas do ouvido humano. Há uma vasta quantidade de informação científica nesse assunto, que pode ser sumarizada como:

- a menor mudança perceptível em amplitude gira em torno de 0,3 dB para tons puros (em situações mais realistas, entre 0,5 e 1,0 dB, cerca de 10% de variação)³;
- a menor mudança perceptível na frequência de um tom é de cerca de 0,2% entre 500 Hz e 2 kHz (faixa em que o ouvido é mais sensível percentualmente)⁴;
- definir a menor quantidade audível de distorção harmônica total não é uma tarefa fácil, dadas as múltiplas variáveis envolvidas e, em particular, as alterações no nível de tensão, fazendo com que o THD mude também – como a maior parte são harmônicos de baixa ordem, percebe-se normalmente cerca de 1%, embora efeitos de cruzamento possam ser notados a 0,3% (e possivelmente abaixo); certamente não há nenhum indício de que um amplificador com 0,001% de distorção harmônica total soe “mais limpo” do que um com 0,005%⁵.

Medidas de distorção harmônica total, feitas com o filtro *notch* convencional, têm uso limitado na análise de perdas subjetivas por imperfeições no caminho do sinal. Em música e outras entradas, problemas de intermodulação são demonstravelmente mais impactantes do que os harmônicos; ainda assim, a análise do THD tem a vantagem única de (na inspeção visual da deformação residual) dar ao observador experiente uma larga gama de informações sobre a causa raiz da não-linearidade. Há muitos outros testes que, embora oferecendo pouca informação ao projetista, excitam toda a faixa de áudio de uma vez, correlacionando-se com experimentos bem conduzidos de deficiências subjetivas causadas por distorção. Os testes de intermodulação de *Belcher* (princípio apresentado na figura 3.3.1) são extremamente esclarecedores, embora pouco conhecidos – situação que deve mudar com a popularização, inclusive financeira, dos chips DSP, elemento fundamental nessa análise.

Uma objeção comumente levantada às análises de distorção harmônica total é que a resolução delas não permite verificar a existência de não-linearidades em níveis baixos, algum tipo de deformação de micro-cruzamento. *Hawksford*, por exemplo, já afirmou que “o fenômeno de cruzamentos em baixo nível põe barreiras sobre a transparência última de um sistema de áudio”⁶ e diversos outros disseram acreditar que os contatos metálicos formam uma rede de chamados micro-diodos. Hipóteses nocivas como essas podem ser dispensadas dos testes de distorção harmônica total.

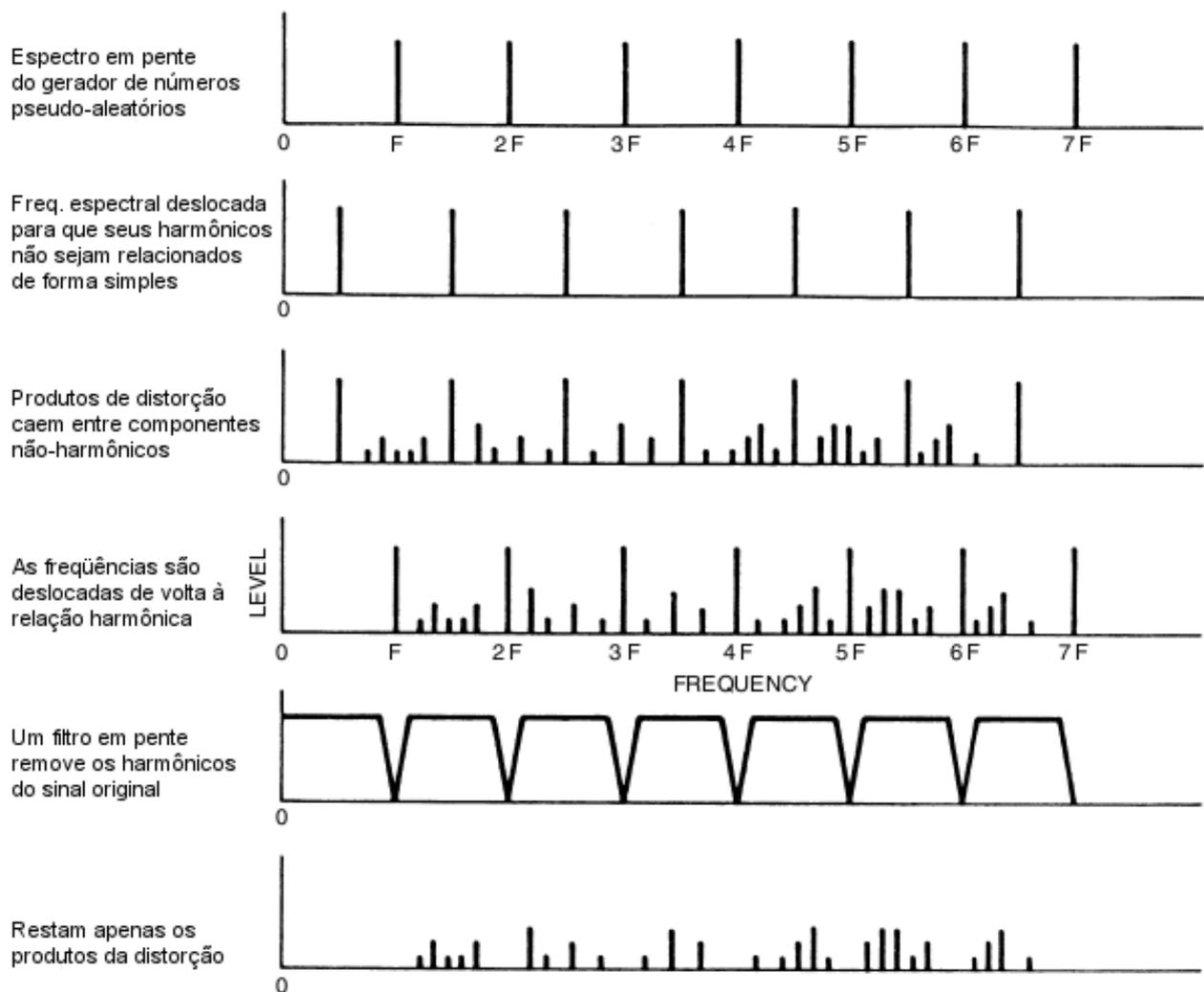


Figura 3.3.1: Base da intermodulação de Belcher. [Self, *The Audio Amplifier Design Handbook*, 2006]¹

Douglas Self desenvolveu um método⁷ de medição do THD abaixo de 0,01% a 200 V_{RMS} (mostrado na figura 3.3.2) e aplicou-o a grandes eletrolíticos, conectores de várias origens e comprimentos de cabo de cobre com e sem propriedades mágicas declaradas. Com níveis de ruído e distorção harmônica total extremamente baixos nos blocos implementados, o uso de um atenuador de pequena resistência, reduzindo o sinal de entrada, mantém o ruído *Johnson* a um valor mínimo. Em nenhum caso qualquer deformação incomum foi detectada:

- a comunicação entre canais pode obviamente degradar a imagem estereofônica, mas o efeito não é perceptível até estar pior que 20 dB (o que seria um amplificador muito ruim);
- atrasos de fase e grupo têm sido uma arena de discussão há muito tempo, mas, como *Stanley Lipshitz* e outros mostraram, são detectáveis apenas quando muito grosseiros; em termos mais práticos, a preocupação quanto aos problemas de fase centralizou-se nos alto falantes e seus cruzamentos, aparentemente o único lugar capaz de apresentar defasagem sem ser acompanhado por uma mudança na resposta em frequência. *Lipshitz*

demonstrou⁸ que um filtro passa-tudo de segunda ordem (com deslocamentos de fase dependentes da frequência sem mudanças de amplitude) é audível, enquanto estudos do departamento de pesquisas da BBC reportados por *Harwood*⁹ indicavam o contrário – uma controvérsia de importância limitada para os projetistas, visto ser absurdo incluir acidentalmente um filtro passa-tudo no circuito. Sem isso, a resposta em fase de um amplificador é completamente definida por seu comportamento em frequência e vice-versa (na Teoria de Controle é a Segunda Lei de Bode, que deveria ser bem mais conhecida na esfera da alta fidelidade). Um dispositivo corretamente projetado possui os pontos de *roll-off* de sua resposta em frequência não muito fora da faixa de áudio e eles terão defasagens correspondentes: não há nenhuma evidência de que sejam perceptíveis⁷.

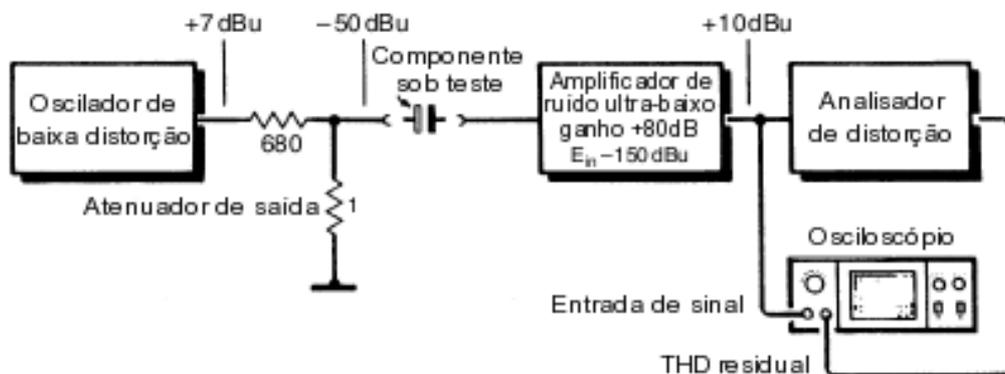


Figura 3.3.2: Montagem para a medição da distorção harmônica total a baixos níveis.

[Self, *The Audio Amplifier Design Handbook*, 2006]¹

A figura do ouvido que emerge da psicoacústica e de seus campos relacionados está longe da de um instrumento de precisão: a sensibilidade que tem, as capacidades direcionais e suas faixas dinâmicas são bem mais impressionantes do que a detecção precisa de variações de nível ou a forma com que sinais de baixa tensão correlacionados são percebidos como deformação harmônica. Do ponto de vista evolutivo, as funções do ouvido são avisar a aproximação de perigo (sensibilidade e senso de direção) e auxiliar a fala. Nesta última, a identificação dos formantes (faixas de harmônicos dos pulsos de excitação das cordas vocais, seletivamente enfatizadas pelas ressonâncias no trato vocal) e as distinções entre vogais e consoantes são infinitamente mais importantes do que qualquer parâmetro de alta fidelidade. A existência da música como uma forma de prazer é presumivelmente um efeito colateral dessas notáveis habilidades de percepção da fala; é ainda um mistério como isso estimula as emoções.

3.4. Alguns Postulados

*Douglas Self*¹ contesta os supostos efeitos listados abaixo, que receberam considerável afirmação na imprensa de áudio, ao ponto de alguns serem tratados como fatos. Nenhum teve qualquer confirmação objetiva nas últimas décadas.

1. Senóides são sinais estacionários que representam um teste simplório para amplificadores em comparação às complexidades da música.

Isso pressupõe que senóides sejam de alguma forma particularmente fáceis de um amplificador lidar, assumindo que qualquer um com um analisador de distorção harmônica total em mãos seja ingênuo. Como esses sinais têm uma série infinita de derivadas não-nulas, estacionário dificilmente seria um termo apropriado; e não há qualquer evidência de que, por exemplo, variações aleatórias em amplitude sejam uma avaliação mais abrangente das qualidades sonoras. “Posturas assim indicam uma visão antropomórfica acerca dos dispositivos, tratando-os como se pensassem sobre o que amplificam: vinte senóides de diferentes frequências podem ter uma complexidade conceitualmente maior para nós (e a saída de uma orquestra sinfônica mais ainda), porém ao circuito tudo se resume a única tensão instantânea, que deve ser aumentada em amplitude e entregue a baixa impedância”¹.

2. Capacitores afetam o sinal que passa por eles de uma forma invisível às medidas de distorção.

Diversos escritores louvaram a técnica de subtração de pulsos de sinal passando por diferentes tipos de capacitor, alegando que o resíduo não-nulo prova a introdução de erros audíveis por esses elementos. Tais testes, entretanto, expõem apenas deficiências já bem conhecidas como a absorção dielétrica e a resistência em série, além de talvez a vulnerabilidade da camada dielétrica dos eletrolíticos à polarização reversa. Ainda não foi mostrada a relação disso com a audibilidade nos falantes de equipamentos devidamente projetados.

3. Passar um sinal de áudio por cabos, trilhas de circuito impresso ou contatos de chaves gera deterioração cumulativa. Superfícies de contato com metais preciosos aliviam, mas não eliminam o problema, também imperceptível em testes de não-linearidade.

A preocupação com cabos é bastante difundida, mas é possível dizer com segurança que não há o que a embase: “qualquer pedaço de fio transmite uma senóide com distorção imensurável e conceitos como retificação intra-cristalina ou micro-diodos, completamente ignorados pela ciência dos materiais, podem ser ignorados”¹. Jamais foi proposta uma forma

plausível de detecção.

O parâmetro mais significativo em um cabo de alto-falante é possivelmente sua indutância interna; que, com uma impedância relevante, pode causar variações mínimas na resposta em frequência no topo da faixa de áudio. Tais desvios dificilmente vão além de 0,1 dB em construções razoáveis (abaixo de 4 μ H) e a resistência típica (cerca de 0,1 Ω), seguindo a curva de impedância do falante, provoca variações normalmente ainda menores de resposta através da banda – em torno de 0,05 dB. Absolutamente inaudível.

A corrosão é muitas vezes vilipendiada por deficiências sutis no sinal nas chaves e contatos conectivos, o que é improvável: de longe a forma mais comum de degradação de contatos é a formação de uma camada isolante de sulfeto, derivada de componentes presentes na poluição do ar. Isso tipicamente corta o sinal de uma vez, exceto quando picos de tensão conseguem atravessar a barreira; é um efeito grosseiro, inaplicável a teorias de debilitação sutil (revestimentos de ouro são uma cura certa, mas custam caro).

4. *A sonoridade das válvulas é inerentemente superior à de qualquer tipo de semicondutor.*

O “som de válvula” é um fenômeno que tem fundamentação: é há muito sabido que ouvintes apreciam certa quantidade de distorção de segundo harmônico¹⁰ e (pelas sérias dificuldades que têm em fornecer boa linearidade) a maioria dos amplificadores valvulados fornecem exatamente isso a níveis modestos de realimentação. Ainda que soe bem, alta fidelidade é sobre precisão e, se a intenção é alterar o som original, que isso seja controlado por um botão de agradabilidade no painel frontal.

O uso de válvulas leva a certos problemas intratáveis de linearidade, confiabilidade e à necessidade de usar os extremamente caros (e mais uma vez não-lineares) transformadores de núcleo de ferro. Como mostra a figura 3.4.1, válvulas expostas são uma moda atual, embora ainda não esteja claro que um envólucro frágil de vidro com ânodos vermelhos, quentes, com centenas de volts DC sobre si seja realmente satisfatório para a segurança doméstica.

Um desenvolvimento recente no subjetivismo é o entusiasmo por triodos *single-ended* diretamente aquecidos, montados usualmente em caríssimos sistemas monobloco. Um amplificador assim gera grandes quantidades de distorção de segundo harmônico devido à assimetria da operação em terminal único e requer um grande transformador de saída, uma vez que seu primário carrega toda a corrente contínua do ânodo e é necessário evitar a saturação do núcleo – as potências de saída são obviamente muito limitadas (10 W ou menos). Em uma resenha, o CAD300SEI, da Cary®, entregava 3% de distorção harmônica total a 9 W e um custo de £ 3400¹¹; e você ainda precisaria comprar um pré-amplificador.



Figura 3.4.1: Amplificador estéreo de alta fidelidade residencial comercializado pela empresa brasileira Pedrone Amplificadores Valvulados & Eletrônica.

5. *Realimentação negativa é algo inerentemente ruim: quanto menos se usar, melhor o amplificador soará, sem exceções.*

A realimentação negativa não é algo inerentemente ruim, trata-se de um princípio absolutamente indispensável em um projeto eletrônico e, se usada corretamente, tem a notável habilidade de melhorar praticamente qualquer parâmetro. O crítico costuma ter o *feedback* global em mente: a realimentação negativa local é aceita com relutância provavelmente por ser quase impossível ter um circuito de bom desempenho sem nenhuma. É comum ouvir que altos níveis de realimentação negativa forçam um *slew-rate* baixo, mas isso não é verdade.

6. *Controles de tonalidade causam deterioração sonora mesmo quando fechados.*

A culpa aqui normalmente cai sobre os deslocamentos de fase, mas controles de tonalidade fechados não podem contribuir com nenhuma alteração e devem ser inaudíveis; são elementos absolutamente indispensáveis para a correção da acústica do ambiente, das deficiências nos falantes, ou mesmo no balanceamento tonal da amostra sonora (há muitas pessoas sofrendo de sonoridade sub-ótima por conta da moda). “Já é lugar comum aos críticos sugerir que inadequações na resposta em frequência sejam corrigidas pela troca dos alto falantes, uma forma incrivelmente cara de se eliminarem problemas de tonalidade”¹.

7. O projeto da fonte de alimentação tem efeitos sutis sobre a sonoridade, sem considerar perigos mais comuns, como a injeção de ondulações.

Todo estágio de amplificação corretamente dimensionado ignora imperfeições em suas fontes de alimentação (amplificadores operacionais sobressaem-se nessa taxa de rejeição). Mais coisas sem sentido foram escritas sobre deficiências de unidades de alimentação do que na maioria dos tópicos de áudio: recomendações como fazer manualmente o cabeamento principal ou usar plugues de 13 A banhados a ouro não parecem ter qualquer sinal de racionalidade dentro do processo usual de retificação e amortecimento pelo qual a tensão contínua passa.

8. Construção em monoblocos (ou seja, duas caixas separadas de amplificadores) é sempre audivelmente superior, dada a redução na comunicação cruzada.

Não é necessário arcar com os altos custos de amplificadores de potência em monobloco para manter a comunicação cruzada sob controle, mesmo para fazê-la substancialmente melhor que os -20 dB realmente necessários. *Douglas Self* cita um amplificador de potência estéreo que projetou e entregava -90 dB a 10 kHz sem nada além das precauções comuns; nessa área, dedicados seguidores a moda pagam resignadamente pelo privilégio, praticamente dobrando os gastos em partes mecânicas.

9. Microfonia é um fator relevante no desempenho de um amplificador, portanto qualquer tentativa de amortecimento de vibrações é uma boa idéia.

A microfonia é essencialmente um fenômeno de pré-amplificadores valvulados sensíveis, vista em amplificadores de potência transistorizados a níveis tão abaixo do ruído inerente que na prática inexistente. Estudos sobre esse efeito são raros (se não desconhecidos), mas *Douglas Self*¹ apresenta um experimento simples: com o pré-amplificador de um microfone operando a um ganho de 70 dB, bata nos capacitores de entrada (assumidos eletrolíticos) de forma brusca com uma chave de fenda e veja que a saída do pré-amplificador será um baque abafado de baixo volume. O impacto físico nos eletrolíticos (únicos componentes que apresentam tal efeito) é muito maior do que qualquer vibração acústica; a microfonia nos amplificadores de potência, se há alguma, deve ser tão desprezível que não pode ser percebida em meio à sujeira intrínseca ao circuito.

Assumindo por um momento verdadeiras algumas das hipóteses acima, serão exploradas suas implicações: os fenômenos, embora audíveis, não são detectáveis por medições convencionais – toma-se como axiomático que para cada defeito sonoro perceptível haja alguma

mudança no padrão flutuante de pressão que atinge os ouvidos e, assim, que ocorreu uma modificação correspondente no sinal elétrico à saída do amplificador (qualquer outro ponto de partida supõe um caminho alternativo de transmissão além dos sinais elétricos, baseando-se na existência de supostas forças desconhecidas à ciência). Conclui-se que existem debilitações nos sinais de áudio que não são mostradas pelos testes convencionais.

As duas explicações plausíveis para tal falha de detecção seriam uma resolução insuficiente nas análises convencionais (embora não haja evidências de que tais micro-desvios sejam audíveis) ou que as medições senoidais de distorção harmônica total deixam de excitar mecanismos recatados de distorção, acionados apenas por música, palavra falada ou outra categoria subjetiva de amostra sonora. Supõe-se assim que permanecem intocados também em testes de intermodulação multi-tonal e mesmo pelos complexos sinais pseudo-aleatórios propostos nos estudos de *Belcher*¹²; método que analisa o caminho de áudio com todas as frequências de uma vez, sendo difícil conceber um defeito real que escape a ele.

Os testes de subtração fornecem a maior evidência de que o subjetivismo é uma falácia: uma técnica devastadoramente simples de comparação entre os sinais antes e depois do amplificador, demonstrando que nada audível permanece. Mostra que tais mecanismos supostamente restritos à excitação musical não são revelados pela música, nem na verdade por nenhuma outra condição, provando enfim a inexistência desses elusivos fenômenos de degradação.

O método foi desenvolvido por *Baxandall*¹³ em 1977 e está esquematizado na figura 3.4.2 (o cuidadoso ajuste da rede de balanceamento do *roll-off* previne que mínimas variações de faixa escapem à distorção residual). *Hafner*¹⁴ introduziu uma versão simplificada (figura 3.4.3), não tão sensível, mas com menos componentes eletrônicos no caminho do sinal, respondendo às objeções levantadas na época. Implementando o experimento, um proeminente revisor subjetivista reduziu-se a alegar que a chave seletora passiva causava uma degradação sônica tão grande que o desempenho do amplificador havia sido totalmente comprometido. Até agora técnicas como essas foram ignoradas pelo campo subjetivista: não houve tentativa no sentido de responder aos sérios questionamentos levantados; e nos mais de vinte anos que se passaram desde o surgimento da tendência, nenhum dos insuspeitos parâmetros de excelência sonora veio à tona.

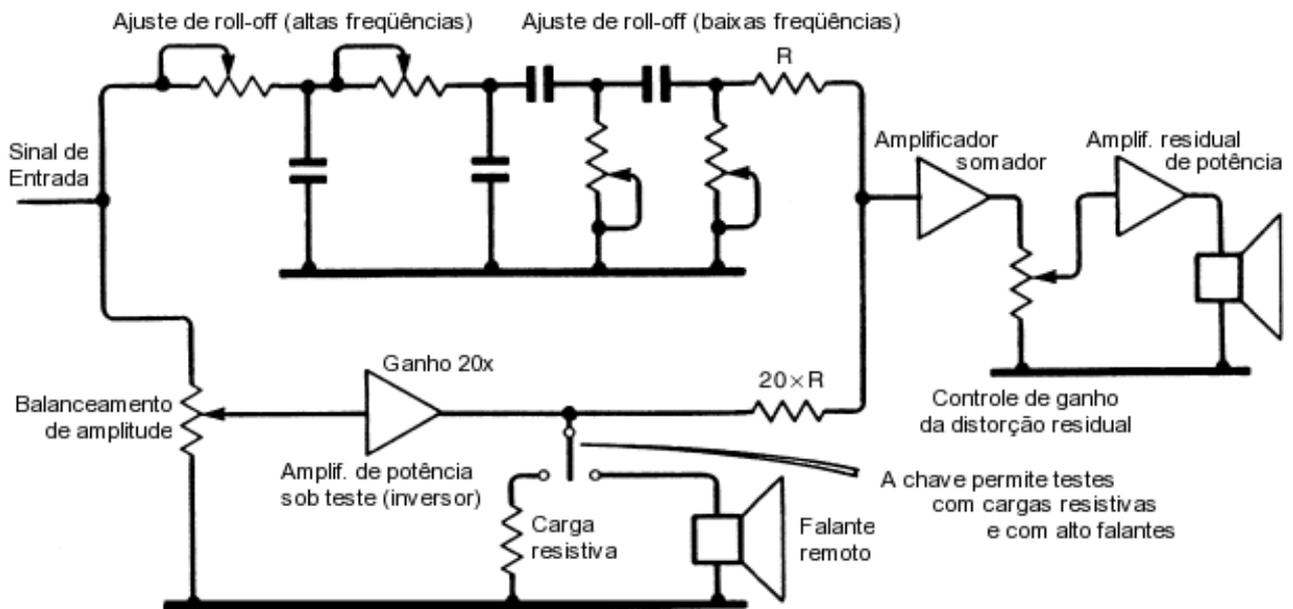


Figura 3.4.2: Técnica de cancelamento de Baxandall. [Self, *The Audio Amplifier Design Handbook*, 2006]¹

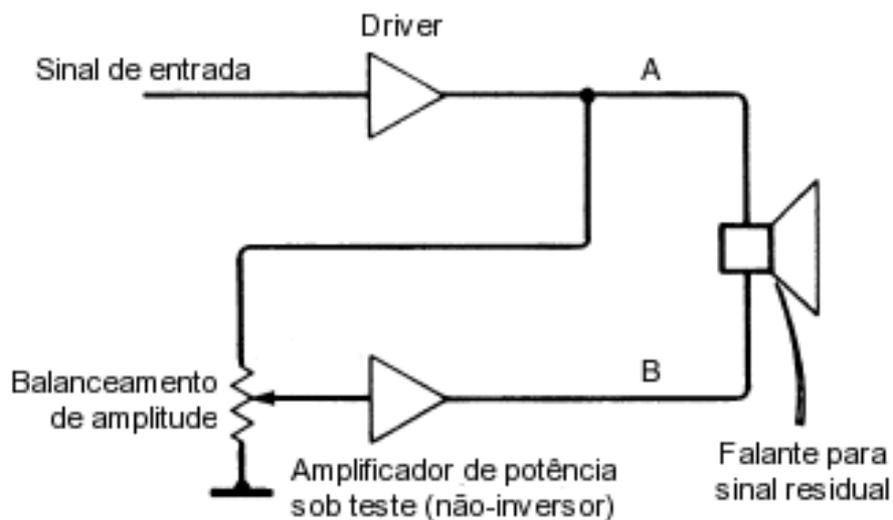


Figura 3.4.3: Teste diferencial de fio reto de Hafler. [Self, *The Audio Amplifier Design Handbook*, 2006]¹

3.5. O Comprimento da Cadeia de Áudio

Uma replicação sólida à existência de fenômenos imensuráveis em amplificadores é a de que sons gravados de quase qualquer linhagem passaram por complexas mesas de mixagem ao menos uma vez; linhas proeminentes como as vocais ou as da guitarra principal, com quase toda

a certeza, mais ainda (uma na gravação e outra no *mix-down*). Especificamente, cruzaram os supostos gargalos de qualidade de um gravador de fitas analógico ou, mais provavelmente, dos conversores A/D de um equipamento digital: no longo caminho até os ouvidos, o sinal de áudio permeia centenas de amplificadores operacionais, dúzias de conectores e diversos metros de cabos sem blindagem. Se tais degradações ocorrem de fato, desafia a razão insistir que aquelas introduzidas no último centésimo do caminho são as críticas.

3.6. As Conseqüências

O estado confuso que vive a crítica de amplificadores traz sérios prejuízos. Se as resenhas têm resultados arbitrários, sendo em particular incapazes de replicação ou confirmação, serão grosseiramente injustas com os fabricantes que perderem na loteria, pois o sucesso comercial de um projeto dependerá apenas de caprichos da moda. Isso talvez não traga problemas nos meios da alta costura ou dos móveis finos, mas o mercado de alta fidelidade em áudio ainda demanda precisão de reprodução como sua razão de ser (espera-se, portanto, que o elemento técnico seja dominante).

Colocar a subjetividade acima das medições põe os projetistas em uma posição nada invejável: nenhum nível de genialidade nem atenção a detalhes técnicos garantirá uma boa revisão e a pressão para serem adotados modismos caros (como cabeamento interno de cristais lineares) é enorme, mesmo com a certeza de que não há nenhum efeito audível. Têm de encarar a escolha entre engolir o credo subjetivista inteiro ou ficarem calados, deixando a conversa para o departamento de *marketing*.

Quando medidas objetivas são deixadas de lado, é inevitável a produção de amplificadores ruins, alguns inclusive com deficiências indubitavelmente audíveis. Em certas resenhas¹⁵ encontram-se facilmente pré-amplificadores de £ 795 (*Counterpoint SA7*) com fracos 12 dB de margem de sobrecarga, outros pedindo £ 2040 por custosos 15 dB (*Burnmester 838/846*), itens que a £ 1550 apresentavam 1% de distorção harmônica total a 1 kHz (uma falta de linearidade que já foi embaraçosa); embora desembolsando £ 5700 seja possível atingir 0,3% (monoblocos *Audio Research M100*). Isso logicamente não significa que seja inviável comprar um dispositivo *high end* mensuravelmente bom: um exemplo é uma combinação entre pré-amplificador e amplificador de potência com respeitáveis 31 dB de margem de sobrecarga de disco e distorção de potência abaixo de 0,003% a 1 kHz ao custo total de £ 725 (*Audiolab 8000C/8000P*) – nota-se a situação paradoxal em que o equipamento mais caro tem o pior desempenho objetivo. Sejam os prós e contras da análise subjetiva quais forem, a maioria das pessoas concordam que este é um

estranho conflito de interesses; e que é moralmente ambíguo tentar convencer alguém externo ao meio técnico de que para ter uma sonoridade realmente boa são necessários pré-amplificadores de £ 2000 enquanto tanto a teoria ortodoxa quanto o senso comum indicam que isso é desnecessário.

3.7. Os Porquês

É possível tirar conclusões empíricas sobre como a engenharia de áudio alcançou o histórico que tem hoje: uma razão básica é a dificuldade em definir a qualidade de uma experiência auditiva; da mesma forma, a memória acústica é ainda mais evanescente do que a visual (vê-se com mais facilidade um ônibus londrino do que se recordam os detalhes de uma apresentação musical). Similarmente, é mais difícil olhar no detalhe, pois subir o volume é quase como aumentar o brilho da imagem na televisão – atingido um nível ótimo, qualquer acréscimo torna-se irritante, depois doloroso.

Há muitos anos a psicologia experimental reconhece, especialmente em estudos sobre a percepção, que as pessoas tendem a notar o que querem, efeito comumente chamado expectativa do experimentador, bem mais insidioso do que soa – a própria história da ciência está repleta das carreiras destruídas daqueles que não souberam proteger-se. Esse auto-engano é mais comum em áreas como a biologia, onde, embora os dados sejam numéricos, não há teoria matemática que os valide: quando os resultados são vagas impressões subjetivas, o perigo é certamente muito maior, não importa o quão absoluta seja a integridade do experimentador. Assim, é preciso grande cuidado no trabalho psicológico, usando-se observadores imparciais, técnicas de dupla-cega e testes estatísticos rigorosos para garantir a significância. A vasta maioria dos escritos subjetivistas ignorou completamente tais precauções, tendo resultados previsíveis. Apenas em poucos casos foram feitos testes auditivos devidamente controlados e, nesses relatos, viram-se diferentes amplificadores indistintos quanto à sonoridade.

Nas resenhas subjetivistas, a resposta correta é sempre a mais cara e inconveniente. A eletrônica é raramente tão simples: uma grande melhoria está mais ligada a novas topologias de circuito ou novos tipos de semicondutor do que com especificações insensatas de versões mais caras dos mesmos componentes. Pode ser difícil uma análise estatística rigorosa, mas essa suposta qualidade subjetiva de um equipamento está muito mais relacionada com o preço do que com qualquer outra coisa. Há talvez um eco da ética de trabalho protestante, em que se deve sofrer agora para aproveitar depois.

Outra razão para o crescimento relativamente sem esforço do subjetivismo é o fato de muitas pessoas serem relutantes em admitir que não conseguem perceber sutilezas acústicas por receio do rótulo de insensíveis, antiquadas ou mesmo surdas. É enfim virtualmente impossível desmentir quaisquer alegações assim, pois o autor poderá sempre esquivar-se por um detalhe, dizendo que havia algo especial na combinação do *hardware* ou que o fenômeno é muito delicado para a brutalidade da lógica ter efeito sobre ele. Em todo caso, a maioria dos engenheiros competentes com um gosto pela racionalidade têm coisas melhores a fazer do que discutir pontualmente cada controvérsia.

Sob tal contexto, alegações vagas tendem (por algum tipo de inflação intelectual) a gradualmente ser consideradas fatos. Os fabricantes ganham certo incentivo para apoiar o campo subjetivista por estes se dizerem os únicos a compreender um particular fenômeno imensurável, embora nada garanta que a sorte não lhes vire as costas em alguma resenha pouco criteriosa.

3.8. A Perspectiva

É provável que o subjetivismo ainda se mantenha por um tempo, dada a inércia que adquiriu, as posições entrincheiradas de algumas pessoas e a triste apatia com que se trata uma asserção infundada como verdadeira simplesmente por ela ser feita com freqüência e convicção. Em um mundo ideal, declarações assim seriam recebidas por pedidos de evidência, mas a história algumas vezes leva a supor de forma pessimista que as pessoas acreditam em qualquer coisa. Por analogia, é possível que o subjetivismo persevere pela mesma razão que a parapsicologia: haverá sempre quem creia no que quer em vez de naquilo que fatos sólidos indicam.

3.9. Erros Técnicos

A má informação em áudio surge no domínio puramente técnico; o próprio *Douglas Self* comprovou que algumas das mais duradouras e largamente defendidas crenças técnicas são infundadas. Por exemplo, cita que aumentando a corrente quiescente de um amplificador classe B para que ele comece a operar em classe A a baixos níveis, ou seja, em classe A/B, a maioria das pessoas dirão que a distorção será reduzida (vista a aproximação à condição de classe A), mas isso não é verdade: um amplificador corretamente configurado tem ainda mais distorção em classe A/B por conta das mudanças abruptas de ganho inerentes à troca de A para B a cada ciclo.

Descobertas assim podem ser feitas apenas porque agora é simples construir amplificadores *testbed* com níveis de distorção extremamente baixos. A redução da deformação ao básico ou mesmo ao nível inerente ao circuito é um requisito fundamental para o trabalho sério de projeto nessa área; em classe B isso dá um padrão de desempenho definido e reproduzível – e baseado nisso *Douglas Self* desenvolveu seu amplificador *Blameless*, assim chamado por evitar erros em vez de alegar novas virtudes.

Demonstrou-se possível, pela configuração convencional de amplificadores de potência de classe B (e mínimas modificações), reduzir a distorção abaixo do piso de ruído a baixas frequências, entre 0,0005% e 0,0008% de distorção harmônica total dependendo do desenho exato, com deformação real substancialmente abaixo disso se forem usadas técnicas de análise espectral para separar os harmônicos do ruído.

4. DISCUSSÃO

4.1. AUDIBILIDADE DA DISTORÇÃO

Há a crença largamente difundida de que todos os amplificadores de áudio têm sonoridades diferentes entre si por motivos sutis e misteriosos, jamais compreendidos. Sem pactuar com uma postura assim, sustenta-se que qualquer dispositivo corretamente projetado, se testado sob condições apropriadas e criteriosamente controladas (incluindo cuidados com sobrecarga), são indistintos para qualquer amostra sonora, não importando quão refinados sejam os testes auditivos – nem os auditores – e que quando um amplificador de qualidade inferior tiver diferenças subjetivas, sempre haverá uma explicação racional seguindo preceitos científicos para justificar a discrepância.

4.1.1. Reações Subjetivas

Quando se declaram diferenças de sonoridade entre dois amplificadores, a real motivação deve sempre ser uma das seguintes:

- os dispositivos de fato produzem distorções audíveis distintas;
- houve pequenas diferenças, possivelmente ignoradas, nas condições de teste;
- fatores psicológicos exerceram influência na análise.

Exemplificando os erros gerados por fatores físicos menosprezados, *Peter J. Baxandall*, em seu artigo *Audible Amplifier Distortion is not a Mystery*¹³, cita uma situação em que, após um amigo declarar-se capaz de perceber a diferença entre bons amplificadores (um a válvula e outro transistorizado), foi verificar tal afirmação. Com uma chave seletora em mãos e sem saber qual dispositivo estava ligado, havia à primeira vista uma diferença perceptível, com um deles tendo sonoridade mais macia (menos “granulada”) do que o outro – era justamente o valvulado. Convencidos de que percebiam auditivamente a distorção de cruzamento, ocorreu-lhes então conferir se os volumes dos amplificadores eram os mesmos: reduzindo pouco menos de 1 dB no nível do transistorizado, ficou impossível distingui-los. Mais adiante, *Baxandall* complementaria esse ponto acrescentando que descuidos quanto ao aterramento dos dispositivos geram ruídos falsamente interpretados como degradação sonora causada pelo circuito em si.

Quanto aos fatores psicológicos, é fácil reconhecer que aqueles dentre nós que declaram ter bons ouvidos para a avaliação sonora são mais facilmente enganados. Por exemplo, exposto por algum tempo a um equipamento de atenuação 6 dB na resposta em frequência a 3 kHz sem o conhecimento disso, a remoção do amortecimento causará (ao menos inicialmente) a impressão de que o som ficou estridente demais. Entretanto, fosse sabido com antecedência, haveria possivelmente um comentário do tipo “agora o som do violino ficou mais realista”. Tais predisposições psicológicas são bastante fortes e devem sempre ser levadas em consideração.

Outro fenômeno comportamental relevante é a dificuldade em, na presença de quem alegue ter notado variações sutis de sonoridade, admitir que não se percebeu nenhuma diferença; uma série de pessoas têm sucesso em convencer a si mesmas da existência de fenômenos acústicos incríveis. Entretanto, em testes subjetivos bem conduzidos, os participantes não sabem a qual sistema estão ouvindo em um determinado momento e o número de trocas (verdadeiras ou não) é grande o suficiente para uma interpretação estatística adequada dos resultados¹⁶. Previna-se assim que vincos inconscientes da percepção influenciem as conclusões do estudo.

Durante uma feira de áudio na Inglaterra em meados dos anos setenta deu-se um exemplo impressionante desse tipo de indução psicológica, quando uma importante empresa do ramo convidou seus visitantes a, após ouvirem seus três amplificadores em volumes idênticos, identificarem a versão mais cara. Ironicamente, o resultado dessa eleição do “melhor” produto teve uma distribuição idêntica nos três modelos (com um terço dos participantes escolhendo a versão correta). Quando informados de seu êxito, expressaram quase em uníssono um orgulho por suas habilidades latentes, enquanto seria igualmente lógico alegrarem-se pela pura sorte que tiveram¹³.

4.1.2. Sistemas de Gravação e Amplificadores

Ao contrário dos amplificadores, gravadores de disco e de fita convencionais, mesmo os de mais alta qualidade, têm níveis de distorção não muito além de subjetivamente bons o suficiente. Como um experimento bastante didático, pode-se gravar um trecho de áudio monofônico em cada um dos canais de um bom gravador de fitas estéreo com uma diferença de, digamos, 10 dB entre eles. Na reprodução, os ganhos de saída são ajustados para magnitudes iguais e subtraindo-se os sinais tem-se, idealmente, nada além de ruído e distorção.

Segundo expõe *Baxandall*¹³, as deformações vêm principalmente do canal com maior ganho na gravação, enquanto o ruído tem sua origem no mais fraco (na prática certa correção de

fase em altas e, possivelmente, baixas frequências pode ser necessária para um cancelamento completo das amostras). Com os ganhos ajustados a um volume confortável de reprodução, a distorção ouvida com ambas as linhas ligadas é horrível e alta o suficiente para ser percebida sem esforços em qualquer local de um cômodo, mesmo com ruído ambiente significativo. Tal pulsante efeito está apenas cerca de 40 dB abaixo da parcela restante da amostra de áudio nas passagens de tensão mais alta; entretanto é imperceptível quando acompanhada de música. Experimentos mais completos mostraram que é uma distorção de terceiro harmônico, que sua porcentagem é proporcional à raiz quadrada da tensão de saída (chegando a 2% no nível máximo) e que é consideravelmente independente da frequência pela maior parte da faixa de áudio.

Nos equipamentos de gravação, a menos que se usem refinadas e caríssimas técnicas digitais, é sempre necessário um cuidado acerca da relação sinal/ruído e da distorção. Os sistemas *compander* (que reduzem ruído a partir da compressão e da posterior expansão do sinal), como o *dbx*, foram um avanço impressionante na relação sinal/ruído subjetiva, trazendo também alguma redução nos níveis de distorção de pico, embora não ajam significativamente sobre a relação sinal/ruído durante as partes mais agudas da amostra. Assim, a confiabilidade continua à mercê de efeitos mascaradores¹⁷, enquanto sons indesejáveis, facilmente perceptíveis quando isolados, ficam virtualmente inaudíveis se acompanhados da música.

Nos amplificadores, por outro lado, é comparativamente fácil reduzir a distorção sonora e os ruídos de geração interna a níveis bem mais baixos que os dos sistemas de gravação (o que se vê nos equipamentos de alta qualidade). Testados sob condições cuidadosamente controladas e livres de problemas como ruído de aterramento e susceptibilidade à intervenção de radiofrequências, têm diferenças insignificantes de resposta; é inevitável afirmar que são indistintos (sob amostras normais de áudio) não importa o quão criteriosos possam ser seus ouvintes.

Foi mostrado pela empresa *Quad*^{18,19} que, em seus amplificadores transistorizados de potência, se a distorção (incluindo problemas de aterramento e outros ruídos) for reproduzida isoladamente em seu volume normal, sem a música, o resultado é um silêncio completo sob condições ordinárias – um desempenho muito melhor do que o obtido, por exemplo, ao aplicarmos um teste similar a um gravador de fitas profissional. Entretanto, fascina saber pelo engenheiro responsável, *Peter Walker*, que poucos dentre os que presenciaram o experimento perceberam sua relevância, que tais amplificadores são subjetivamente perfeitos com larga margem quanto ao desempenho audível, algo que não se pode aprimorar. É claramente colocado, por fim, que eles não são os únicos dispositivos sobre os quais tal afirmação possa ser feita. Obviamente, se durante o experimento há a sobrecarga de algum dispositivo, mesmo que momentaneamente, o silêncio é quebrado e a distorção, estilhaçada por todos os lados; mas amplificadores não devem

ser sobrecarregados e, se forem, as únicas soluções plausíveis serão reduzir o volume ou trocá-los por outros mais potentes.

Houve quem levantasse objeções ao experimento descrito acima dizendo que, embora a distorção seja imperceptível isolada, o ouvido e o cérebro são extremamente complexos e, assim, o efeito da deformação seria notado apenas quando ela acompanhasse a música. Algo contrário ao resultado da experiência com o gravador, quando a distorção era facilmente percebida sozinha, mas muito bem mascarada pelo sinal sonoro. Outros experimentos feitos por *Baxandall* com relação à distorção de cruzamento mostraram que ela também é ocultada em bom grau pela amostra musical correspondente.

4.1.3. Uma Ferramenta no Diagnóstico

A técnica empregada pela *Quad*^{18,19} para isolar a distorção a partir de uma amostra sonora forneceu uma ferramenta muito útil na avaliação subjetiva da qualidade de um amplificador em termos quantitativos e no estabelecimento de um critério que ele deve seguir para ser considerado realmente livre de distorções audíveis. Essa técnica pode obviamente ser implementada de diversas formas diferentes – a figura 4.1.3.1 ilustra uma montagem para elementos com inversão de fase (quando, como é mais comum, o circuito não for assim, um inversor de baixa distorção poderá ser montado na seqüência ou em outro dos vários lugares possíveis).

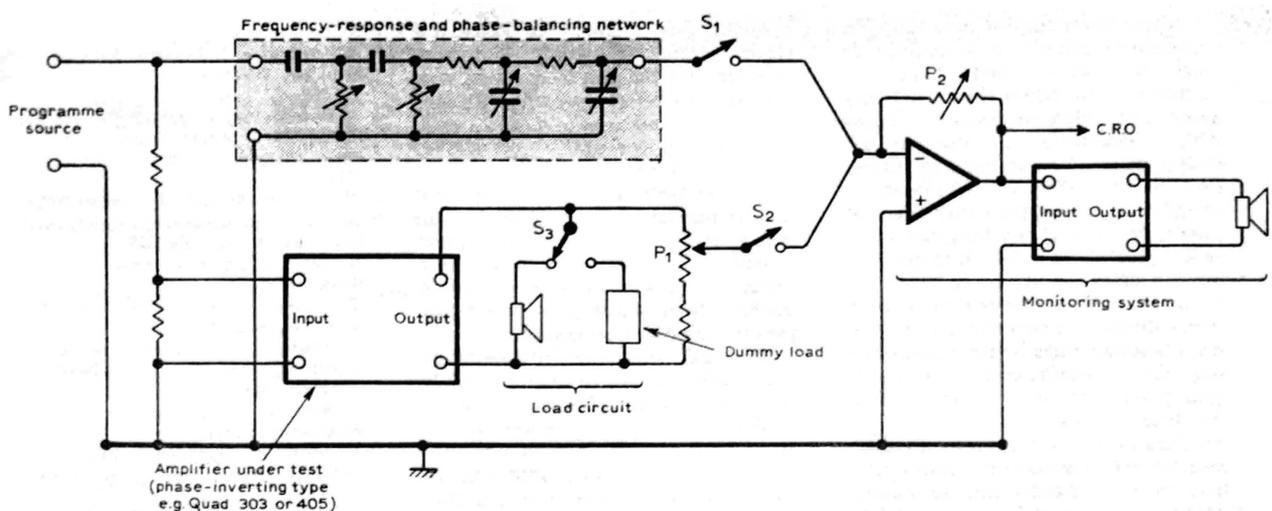


Figura 4.1.3.1: Montagem de diagnóstico. [Baxandall, *Audible Amplifier Distortion is Not a Mystery*, 1977]¹³

Durante a montagem, *Baxandall*¹³ constatou que um gerador de ruídos de áudio seria mais adequado à prática do que uma amostra musical convencional, visto que todas as frequências estão presentes o tempo todo. S_1 e S_2 foram então fechados e configuraram-se P_1 e a rede de balanceamento das respostas em frequência e fase para o mínimo de tensão de saída sobre o sistema de monitoramento. O potenciômetro P_2 foi inicialmente colocado em baixa impedância, valor que cresceu à medida em que o balanceamento ficava mais próximo do ideal. P_2 enfim foi ajustado para, com S_1 e S_2 abertos, a tensão sobre o alto falante de monitoramento ser a mesma na carga do amplificador em teste. Fechando novamente ambas as chaves, a distorção foi reproduzida isoladamente pelo falante do sistema de monitoramento em seu volume correspondente. Com o circuito enfim configurado (uma atividade bastante trabalhosa por conta dos diversos ajustes necessários), viu-se uma grande variedade de análises interessantes e informativas que poderiam ser feitas imediatamente, como:

- o ganho do sistema de monitoramento aumentar até que a distorção seja perceptível, obtendo-se a margem pela qual ela era antes inaudível;
- avaliar o efeito de alto falantes ou cargas fantasma de diferentes impedâncias sobre a distorção sonora do amplificador testado, sendo sempre necessário, logicamente, evitar que o sinal de saída chegue a quem ouve a distorção pelo sistema de monitoramento (em vez de usar ambientes isolados acusticamente e cabos extensos, gravar a distorção para audições posteriores é um procedimento bem mais conveniente);
- os dois falantes da figura 4.1.3.1 podem ser dispostos próximos um ao outro, ajustando-se P_2 para determinar o quanto a distorção deve estar acima de seu volume natural para ser perceptível a degradação do sinal sonoro;
- fechando apenas a chave S_2 (e depois somente a S_1), coloca-se P_2 para uma audição adequada à saída do sistema de monitoramento e a reprodução no amplificador testado pode ser comparada à obtida na rede passiva – em amplificadores *high end* não deve ser detectada nenhuma discrepância qualquer que seja a amostra sonora, assumindo que não haja sobrecarga no amplificador (pode-se ainda estender esse teste à verificação dos impactos de diferentes níveis de sobrecarga com ou sem circuitos de proteção);
- quando dois amplificadores são tidos como genuinamente diferentes em testes subjetivos convencionais, podem então ser avaliados em um circuito como o exposto acima para que seja verificada a distorção audível por si só. Ela pode ser de sobrecarga mesmo abaixo da tensão de ceifamento esperada por conta da operação do circuito de proteção ou apenas de uma má concepção quanto à taxa de variação (possibilidades que poderão então ser avaliadas em detalhe). Caso ambos tenham distorções inaudíveis (ou inobstrutivas), vale verificar um dos amplificadores com os valores de resposta em frequência e

balanceamento de fase do outro: se houver diferença de qualidade significativa com apenas S_1 ou S_2 fechados (considerando ganhos idênticos nos médios), é provável que seja por pequenas distinções na resposta em frequência – a sub-áudio é particularmente importante porque tais sinais, ao atingirem o falante, podem causar movimentações relevantes em seu cone, distorcendo a saída do sistema;

- usando um osciloscópio no arranjo da figura 4.1.3.1, aprende-se muito sobre a relação entre a o contorno de deformação e sua correspondente natureza subjetiva. Esse sistema também tem a virtude de, junto a uma entrada de tom, mostrar a verdadeira forma de onda da distorção do amplificador, sem interferências das debilitações do oscilador nem das pequenas defasagens de harmônicos (contribuição do filtro de corte implementado).

Uma disposição como a apresentada é, por fim, capaz de embasar uma técnica precisa e bastante satisfatória para a medição das distorções harmônicas e de intermodulação, com a vantagem de não demandar um alto nível de pureza na forma de onda do sinal de entrada.

4.1.4. Revisões de Amplificadores

A crença de que todos os amplificadores têm sonoridades diferentes parece estar ainda mais fortemente enraizada na imprensa popular de alta fidelidade e em seus times de revisores do que nos projetistas. Um grande desserviço tem sido feito tanto para os consumidores quanto para alguns fabricantes por reportagens sobre amplificadores e unidades de controle como as que apareciam, por exemplo, em algumas edições da revista *Hi-Fi for Pleasure*^{20,21}. Seus revisores alegavam-se capazes de perceber de ouvido deficiências específicas em virtualmente todas as unidades submetidas a eles, incluindo diferenças de cancelamento e com controles de tonalidade zerados (sempre que houvesse espaço para tais colocações). Mas a incredulidade dos leitores era realmente levada além de quaisquer limites quando se descrevia uma unidade de controle bem conhecida, amplamente usada por profissionais criteriosos, como tendo uma faixa de médios avançada, mas pobre em detalhes, com alguma compressão nos picos e uma imagem instável, um desempenho de altas frequências fino e arredondado, porém com uma reprodução alardeada dos pratos e outros sons explosivos similares; o desempenho como um todo sendo resumidamente fraco, com grande perda de presença e ambiência, “fazendo com que o som pareça amador”! Testada novamente pelos fabricantes, verificaram perfeito funcionamento. Quando descrições assim, adequadas apenas a equipamentos com problemas grosseiros, são usadas em relação a itens sabidamente de alta qualidade, fica explícito algum problema com o teste ou que os revisores (sem questionar sua sinceridade) foram vítimas da própria imaginação.

Dado ser largamente aceito tratar todos os amplificadores como tendo sonoridades diferentes entre si, é natural que se procurem explicações técnicas para tanto. Como foi encontrada muito pouca correlação entre os desempenhos nas mensurações convencionais, construiu-se a idéia de que estava envolvido algo extremamente sutil e elusivo. Na tentativa de explicarem tais supostas sutilezas, aqueles com mais imaginação que conhecimento científico passaram a envolver uma série de hipóteses pseudo-científicas cada vez mais selvagens: novos jargões foram criados, como “musicalidade” e “perda de informação”.

Um artigo francês foi publicado na revista *Hi-Fi News*²² nos anos setenta – ainda que acompanhado de um forte friso de neutralidade editorial – alegando que a qualidade do cobre usado nos falantes tinha influência sobre a informação transmitida, sendo ideais os fios de pureza em torno de 99,99995%. O campo magnético gerado pelos cabos dos falantes traria uma perda significativa de informação. Mesmo no cabeamento de campainhas elétricas, afirmava-se que o uso de fios *Litz* proporcionavam uma “superioridade tintinabular”. Esse tipo de postura, que parece ter sido encorajada por alguns periódicos de áudio (aos quais, indubitavelmente, fornecia material fácil para páginas e mais páginas), é certamente danoso ao futuro dessa indústria, destruindo sua reputação perante o público mais criterioso.

Admitindo-se que as sutilezas e dificuldades dos vários aspectos da boa reprodução sonora são enormes, é uma pena uma atmosfera de misticismo tão irracional seja estimulada a entrar em campos como a engenharia de áudio, de desenvolvimento sólido e progressista.

4.1.5. Conclusões Parciais

Um dos pontos tirados dos testes expostos é que amplificadores de fato tendem a diferir no grau em que suas distorções de sobrecarga incomodam, mas, a despeito disso, não há como alguém que fez uso destas técnicas de análise largamente subjetivas continuar a crer que todos soam diferentes entre si ou que um dispositivo subjetivamente perfeito ainda está por vir. É por isso que a *Quad*®, desde meados dos anos setenta, põe à prova sua reputação, afirmando sem reservas que aceitam o desafio de terem seus produtos comparados em um sistema como o da figura 4.1.3.1 (com o que *Peter Walker* chama “um fio reto com ganho”). Dadas as condições adequadas a uma análise assim, tal alegação mostra apenas que ninguém será realmente capaz de perceber a mínima diferença na qualidade para qualquer amostra sonora derivada de fontes de áudio convencionais.

Aqueles ainda não convencidos podem bem dizer “se a perfeição subjetiva já foi atingida, por que fabricantes ainda dedicam tanto esforço de pesquisa e desenvolvimento para fazerem amplificadores melhores”? Na realidade um projetista inspirado possivelmente gasta a maior parte de seu tempo lutando contra problemas bem mais difíceis, como atingir uma maior confiabilidade, simplificar o projeto (reduzindo custos de manufatura), eliminar a necessidade de pré-regulagens, aumentar a máxima saída do sistema, aprimorar a capacidade do amplificador de lidar com uma gama maior de valores de carga. Nenhum desses desafios envolve a qualidade subjetiva do som.

É ao considerar problemas como os citados acima que fica evidente a verdadeira natureza dos enormes avanços feitos na tecnologia dos amplificadores de áudio. Em 1938 um equipamento britânico de alta qualidade com 14 W era vendido por cerca de £ 19, entregando cerca de 0,74 W por £ 1. Em meados dos anos setenta, um dispositivo estéreo de 200 W de menor tamanho e peso era vendido em torno de £ 115, entregando 1,7 W por £ 1. Considerando a inflação, vê-se que o verdadeiro custo por *watt* caiu por um fator de ordem dez com as técnicas transistorizadas comparado à era da válvula²³ – certamente uma grande conquista da engenharia.

Sem o conhecimento de tais critérios derivados da impressão do usuário, é natural brincar por segurança e fazer o desempenho muito acima do que ele realmente precisa ser, particularmente o caso dos projetos de pré-amplificadores ou de unidades de controle, com distorções por não-linearidade comumente de curvatura suave, que não precisam ser reduzidas além do ponto em que são inaudíveis. Um refinamento do desenho (com conseqüente aumento de custos) até a deformação ser, digamos, cem vezes menor do que o limite subjetivo de percepção – embora plenamente realizável – foge aos interesses dos consumidores. É desnecessário dizer que, por outro lado, exige-se maior cuidado nas partes de grande valor agregado, como haver *headroom* adequado às sensibilidades dos captadores, atingindo-se baixos ruído e susceptibilidade a interferências externas da fonte de alimentação e das radiofrequências.

Uma vez que o projetista esteja livre dessa série de crenças irracionais e infundadas como a de que há uma inerente e sutil diferença entre as sonoridades das válvulas e dos transistores, de que os transformadores sempre produzem uma perceptível distorção subjetiva, de que os amplificadores de classe B não conseguem nunca soar tão limpos quanto os de classe A, de que a realimentação pode ser apenas usada em pequenas quantidades, poderá enfim prosseguir de uma maneira cientificamente adequada no desenvolvimento de dispositivos com boa economia, confiabilidade e desempenho audível imaculado. Perceberá que há incontáveis formas de se projetarem amplificadores igualmente bons, concentrando seus esforços na busca da melhor solução de engenharia.

4.2. NÍVEIS DE DISTORÇÃO DETECTÁVEIS

É comum fabricantes fornecerem uma quantidade razoável de dados sobre a margem de deformação introduzida por seus amplificadores e receptores de rádio (embora com alto falantes não seja realmente assim), informações que aparecem normalmente como menções da distorção harmônica total – soma em raiz quadrática média dos harmônicos individuais. Seus valores típicos estão entre 0,01% e 0,1% para amplificadores, 0,1% e 0,3% nos receptores de rádio e cerca de 0,5% em alto falantes; gravadores/reprodutores analógicos têm distorções bem mais elevadas, oscilando de 3% a 8% mesmo em equipamentos profissionais. Partindo do ponto plausível de que baixos níveis de distorção harmônica são desejáveis para atingir a alta fidelidade, é necessário saber o THD de um dispositivo.

4.2.1. Contexto dos Padrões de Mensuração

A adoção da distorção harmônica total como medida objetiva em juízos subjetivos das deformidades segue a padronização internacional, embora os componentes de intermodulação que a acompanham sejam reconhecidamente responsáveis pelo caráter distinto do sinal distorcido. Na maioria dos casos, os desvios de intermodulação totais são diretamente proporcionais ao THD, com os valores relativos dependendo apenas da razão entre as amplitudes dos dois sinais testados.

De toda forma, as taxas de distorção harmônica seriam muito bem complementadas pelos níveis realmente detectáveis (ou minimamente aceitáveis). Uma distorção de 0,1% é de fato perceptível quando a amostra musical está sendo reproduzida? Um amplificador com 0,01% ou 0,001% soa “mais limpo” do que um com 1% de THD? É para este problema que a discussão presente está direcionada: seria idealismo sugerir a distorção nula como meta; uma abordagem mais realista é testar e definir o nível detectável com equipamentos modernos e ouvintes críticos.

São tantas as variáveis que dificilmente emergirá um único número: mesmo na situação simples em que os sinais de teste são tons de única frequência, é impossível especificar um valor sem trazer grandes limitações. Um observador experiente perceberá a adição de um segundo ou de um terceiro harmônico abaixo de 0,1% e, podendo fazer repetidas comparações entre os sons distorcido e original, baixará o nível de detecção por um fator de pelo menos dez – então 0,01% será detectável (entretanto a distorção em tons senoidais raramente tem importância além da esfera acadêmica e por isso não será mais levada em conta). O mesmo problema surge ao se

tentar perceber os desvios em amostras musicais: se as instalações de teste permitirem uma variação suave da distorção, o nível realmente detectável continuará a cair à medida em que a experiência do observador cresce. Dificilmente qualquer figura será significativa sem que sejam fornecidos dados completos da rotina de avaliação.

4.2.2. Mapeamento das Variáveis

Definir o nível de distorção realmente detectável em uma amostra sonora é inerentemente mais difícil, visto que o sinal varia constantemente em amplitude e o valor instantâneo da distorção o acompanha nessa flutuação. A figura 4.2.2.1, exposta por *James Moir* em seu artigo *Just Detectable Distortion Levels*⁵, é um gráfico dos níveis instantâneos durante um minuto da música *Molly on the Shore* (de *Percy Grainger*) tirado do registro nº K.53574 da gravadora *Enigma*. Entre os pontos 1 e 2 vê-se uma variação de pelo menos 30 dB, mas esse não é um exemplo extremo, já que gravações podem lidar com mudanças entre 50 e 60 dB (faixa comumente empregada).

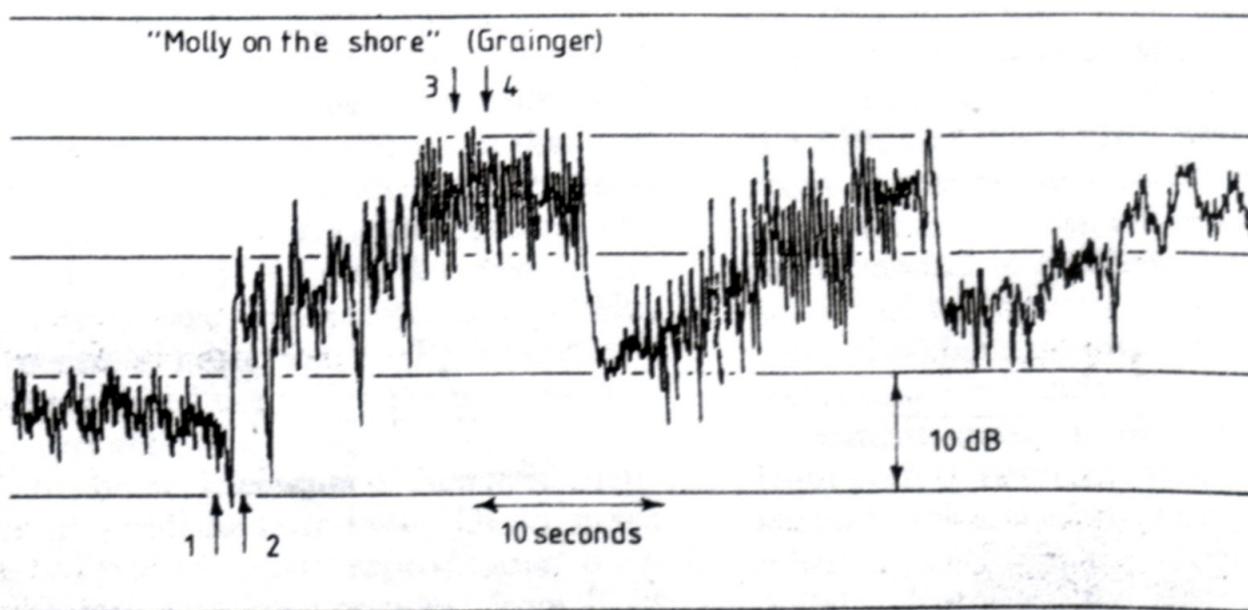


Figura 4.2.2.1: Ilustração das largas variações de nível do sinal de áudio durante um minuto de execução da música "Molly on the Shore", de Percy Grainger. [Moir, "Just Detectable" Distortion Levels, 1981]⁵

Observando alguns registros da variação da distorção com o sinal de saída de um amplificador convencional e um alto falante doméstico, *Moir* apresenta os resultados da figura 4.2.2.2. Assumindo um nível máximo de 95 dB a 1 m como o máximo reproduzido, vê-se que o desvio é da ordem de 3% – cerca de 30 dB abaixo, a distorção cai para menos de 0,1%.

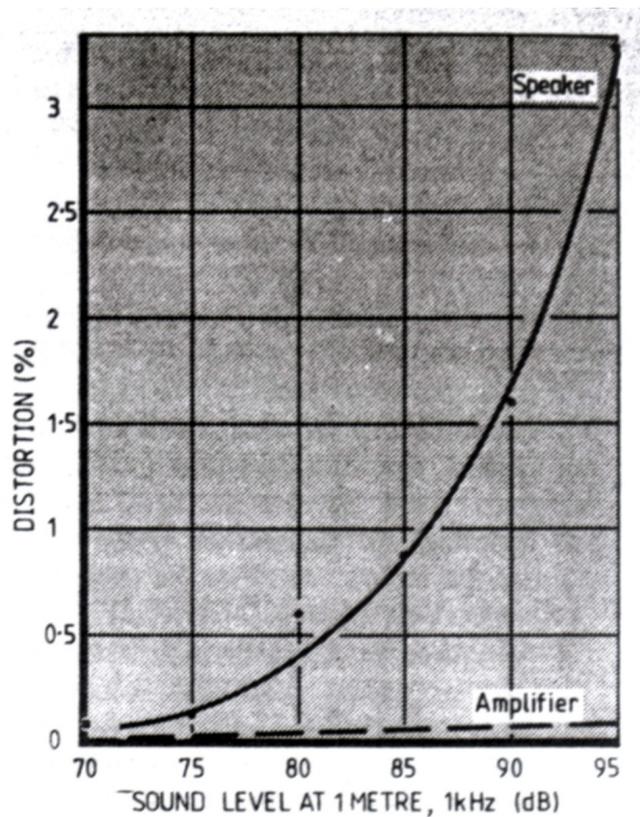


Figura 4.2.2.2: Distorção percentual por nível sonoro em alto falante e amplificador de oito entradas típicos. [Moir, "Just Detectable" Distortion Levels, 1981]⁵

O amplificador introduz muito menos distorção: se o nível sonoro de 95 dB for atingido por uma saída de potência 10 W (um falante bastante ineficiente), a introdução será de 0,1% ou menos, caindo ainda mais a potências inferiores. Assim, a deformação audível no sinal acústico é quase toda por conta do alto falante, oscilando na proporção 30:1 quando a saída do sinal acústico varia sobre uma faixa de 30 dB (a concordância numérica é mera coincidência); o problema passa a ser decidir um valor efetivo da distribuição quando há variações dessa grandeza em uma pequena parte da amostra. O grau de distorção detectável é claramente uma função da dispersão no tempo das amplitudes instantâneas da música: se sinais altos são mantidos por uma pequena fração do tempo total, seus altos níveis de deformação serão menos distintos do que quando tais picos ocupam uma fração maior dos poucos segundos em que o cérebro é capaz de analisar o sinal durante sua exposição à música.

Tem-se que a detectabilidade da distorção depende não apenas de seu valor instantâneo, como também da duração do tempo em que cada rajada de deflexão persiste. A partir de experimentos de fusão de pulsos tonais, Moir⁵ conclui que o usuário demanda um intervalo de 10 a 20 ms para formar uma opinião acerca de um conteúdo espectral de médias frequências (tempo de processamento que sobe para entre 40 e 60 ms no limite de baixas frequências do espectro), esclarecendo a sensibilidade menor do sistema auditivo a distorções de curta duração, o porquê

do mínimo nível perceptível aumentar rapidamente à medida em que a duração do desvio decresce.

James Moir investigou esse aspecto com um simples ceifador de diodos *zener* agindo sobre pulsos senoidais de comprimento variável enquanto, por fones de ouvido, buscava o ponto de distorção simplesmente detectável (resultados presentes na figura 4.2.2.3). A deformação pelo ceifamento de um pulso de 4 ms chegou a cerca de 10% antes de ser notada, mas um aumento no comprimento para 20 ms trouxe o ponto perceptível para cerca de 0,3%. Como consequência, é notável que instrumentos indicadores da amplitude da amostra, nos quais a deflexão depende das medições de pico de amplitude do sinal (PPMs) – em vez da média ou da amplitude RMS (medida VU) – têm a desvantagem de considerar picos de sinal que não têm efeitos audíveis. Em diversas aplicações o uso de um medidor tipo PPM pode apenas resultar na redução do SNNR (*Signal plus Noise/Noise Ratio*). Resumindo, a passagem que contém talvez um pico com a duração de alguns segundos soará “mais suja” do que uma similar com inúmeros cumes de mesma amplitude, mas todos de curtos períodos (ainda que a duração total dos picos seja a mesma em ambas as passagens).

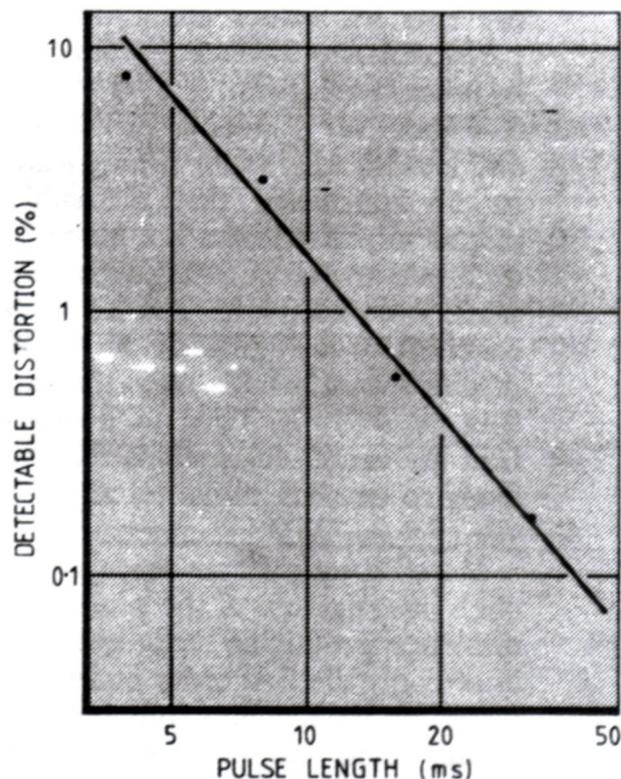


Figura 4.2.2.3: Distorção detectável por duração de pulso para rajadas senoidais a 1kHz.

[Moir, “Just Detectable” Distortion Levels, 1981]⁵

Há outros fatores relevantes: é bem estabelecido que distorções de dependência simples em amplitude (harmônicas e de intermodulação) são menos óbvias quando a distorção ocorre no limite de baixas frequências do espectro. Os dados citados anteriormente sugerem que o valor simplesmente detectável da distorção a 100 Hz é cerca de dez vezes o obtido a 1000 Hz. Assim, o nível depende possivelmente não apenas da distribuição temporal dos picos de amplitude na música, mas também na faixa de frequência em que eles ocorrem; caracteristicamente, picos mais duradouros ocorrem a baixas frequências, onde a distorção introduzida não é notada com tanta facilidade. De fato, é comumente dito que a distorção inserida na região de baixas frequências faz a música soar mais “rica”, “redonda” ou “encorpada” – uma visão que não convém a quem trabalha com alta fidelidade.

Vastas evidências (algumas detalhadas em seguida) indicam que distorções de intermodulação resultantes da curvatura de segunda ordem da função de transferência são subjetivamente menos perturbadoras do que quando introduzidas pelas de ordem ímpar – mais uma vez, qualquer figura simples, de um único valor, tida como representação objetiva da distorção total de um sistema dificilmente estará de acordo com a estimativa subjetiva da conseqüente deterioração na qualidade, visto que o incômodo trazido pela presença da distorção depende também da ordem do harmônico responsável pela maior proporção da deformação mensurada.

Em resumo, a distorção realmente detectável depende de:

1. a relação entre o nível máximo e a taxa média da amplitude do sinal durante um intervalo real de audição;
2. a duração de cada pico de amplitude: dez picos de 2 ms cada são menos distintos do que um de 20 ms em um mesmo intervalo;
3. a faixa de frequência em que a máxima distorção ocorre: ápices de deflexão no limite de baixas frequências da faixa de áudio são detectados com mais dificuldade do que amplitudes iguais a médias frequências;
4. a ordem dos harmônicos introduzida pela sobrecarga: harmônicos pares, com suas componentes quadráticas de distorção de intermodulação resultantes, não são tão notáveis quanto os ímpares e suas componentes cúbicas de distorção de intermodulação resultantes.

4.2.3. Evolução das Padronizações

Mesmo com tantas complicações, houve diversas tentativas sérias de se determinar um índice para a distorção perceptível e elas serão brevemente consideradas, embora a grande dispersão das datas dos testes, a qualidade intrínseca dos sistemas de áudio empregados e a variação nos métodos de expressão demandem grande cuidado em qualquer comparação pormenorizada dos valores.

Com um sistema declaradamente uniforme entre 40 Hz e 14 kHz, *Bengt Olson* sugeriu que a introdução de 0,7% de deformação era perceptível, com o JDD (*Just Detectable Distortion*) invariante tanto em ordens pares como nas ímpares, uma conclusão que destoa de quase todas as obtidas nas investigações posteriores. Percebeu também que a distorção realmente detectável dobrava ao restringir a faixa de frequência a 4 kHz – possível motivação para o famoso comentário de *P. P. Eckersley* “quando maior a janela, mais sujeira entra”. Em seu livro *Elements of Acoustic Engineering*¹⁷, de 1940, *Olson* declara: “testes de reprodução musical em um sistema com uma resposta uniforme de 45 a 8500 Hz com nível de pico 80 dB mostraram que distorções de 5% em segundo harmônico e 3% em terceiro harmônico são perceptíveis em comparação direta com um sistema tendo menos de 1% de distorção total”.

Ao final dos anos trinta, o problema da determinação do nível de distorção realmente detectável era pauta importante para os administradores das empresas de telefonia do mundo todo, que tentavam sanar as limitações de desempenho nas linhas, usadas para a distribuição internacional de fala e música. Os alemães *Braunmuhl* e *Weber*²⁴ e os departamentos de pesquisa da BBC e dos Correios (na Inglaterra) fizeram extensivas investigações no assunto, com os testes gerando inclusive informações sobre a sensibilidade do sistema auditivo à distorção em faixas de frequência selecionadas. Não há concordância hoje com os resultados obtidos, afirmando que distorções são perceptíveis apenas acima da faixa entre 1% e 2% em frequências além de 500 Hz (podendo chegar sem impacto a algo em torno de 15% a 25% quando abaixo de 100 Hz) – por outro lado, foram as primeiras sugestões de que distorções harmônicas de ordem ímpar são subjetivamente mais incômodas que as de ordem par.

Após cerca de quinze anos, em 1950, *D. E. L. Shorter*²⁵, do Departamento de Pesquisas da BBC, comparou a qualidade sonora de um número de sistemas em que o espectro de harmônicos era desconhecido. Confrontando amplificadores de diferentes imagens harmônicas, concluiu que o JDD era de 0,4% em uma situação e 2,6% na outra, mostrando a dispersão dos valores de distorção que pode ser esperada de qualquer índice único do nível realmente detectável. Obteve melhor coerência entre a opinião subjetiva e as medições objetivas ao multiplicar cada harmônico

por $n^2/4$ antes da somatória RMS (n sendo a ordem do harmônico): a dispersão dos valores foi reduzida à faixa de 0,8% a 1,3%; mas deve ser lembrado que ponderações assim impedem tais números de serem diretamente comparados a outros sem ponderação, frutos de outras análises.

*Wigan*²⁶, em 1961, fez uma investigação bastante sólida do problema e chegou à conclusão de que a perturbação subjetiva é uma função da taxa de variação no tempo do distanciamento do sinal em relação à normalidade. Seus resultados e conclusões, entretanto, são dificilmente aplicáveis em casos práticos, em que se têm apenas dados acerca dos harmônicos – de toda forma, confirmam as indicações anteriores de que há larga flutuação em qualquer valor sugerido de distorção realmente detectável.

Posteriormente, *Fryer*²⁷ aprofundou as análises do problema com uma técnica de deformação que inseria apenas componentes de intermodulação de primeira ordem sobre o sinal limpo: ouvintes masculinos habilidosos foram capazes de perceber componentes entre 2% e 4% em música de piano e 4% e 5% para outras amostras (a montagem, por outro lado, não introduz a distorção harmônica que inevitavelmente acompanharia os produtos de intermodulação se resultassem da curvatura das características de transferência de um amplificador ou outro componente do circuito). Fossem tais parcelas harmônicas incluídas, a soma RMS seria provavelmente próxima do limite mais alto do nível de distorção perceptível citado, 4%; mas, como com os dados ponderados de *Shorter*, tais porcentagens de JDD não podem ser diretamente comparadas às obtidas por outros meios.

4.2.4. Revisitação dos Experimentos

*James Moir*⁵ repetiu esta análise na década de oitenta usando equipamentos mais modernos. A fonte de sinal sonoro foi um *master tape* de quinze polegadas por segundo de um concerto orquestrado com a saída do amplificador alimentando um par de fones de ouvido escolhidos pelas boa resposta em frequência e particular baixa distorção. Houve especial interesse na audibilidade da distorção de cruzamento (uma forma particularmente perturbadora) e ajustes simples no circuito de *bias* permitiram variações suaves na inclinação dos estágios de saída por um único botão de controle, indo da sub-inclinação à super-inclinação, modificando largamente a quantidade de distorção de cruzamento.

O sinal de saída do amplificador foi monitorado por um osciloscópio para avaliar limitações de amplitude e reproduzir as formas de onda de calibração. A inclinação nos estágios de saída foi ajustada até a deformação na amostra ser subjetivamente detectável. O controle do *bias* tinha

marcações de regulagem: elas foram registradas em cada observação e tratadas estatisticamente por cerca de vinte determinações para que se pudesse citar o valor de distorção perceptível. Leituras adicionais a um nível significativamente inferior de deformação confirmaram que o desvio residual de 0,13% do equipamento não tinha influência nos resultados.

É uma técnica muito precisa para a determinação da distorção realmente detectável, pois após algumas comparações o experimentador passa a reconhecer a forma particular de distorção introduzida na música pela mudança da inclinação, tornando-se cada vez mais sensível àquele desvio particular. Passados cerca de dez a quinze minutos, sua percepção provavelmente cresceu por um fator de pelo menos dez vezes.

Conforme já mostrado, o conteúdo realmente distorcido na reprodução não pode ser diretamente medido, mas é possível estimá-lo indiretamente: marca-se na tela do osciloscópio a amplitude pico-a-pico da amostra no ponto em que a distorção foi realmente detectada, substituindo-a por um sinal senoidal de mesmo valor; por sua vez analisado através dos fones de ouvido da maneira convencional com um analisador de banda fina do tipo *Marconi TF2330* (medindo separadamente todas as componentes até a vigésima). A figura 4.2.4.1 mostra a amplitude de todos os harmônicos presentes e ainda reproduz a forma de onda da senóide com amplitude pico-a-pico igual à da amostra sonora. Se a somatória RMS dos harmônicos for feita no formato usual, será 1,2%; caso ponderada segundo a técnica de *Shorter* (multiplicando cada harmônico por $n^2/4$), 15%. É interessante notar que quando a distorção em um sinal senoidal é visualmente detectável, ela pode também ser percebida pelo sistema auditivo.

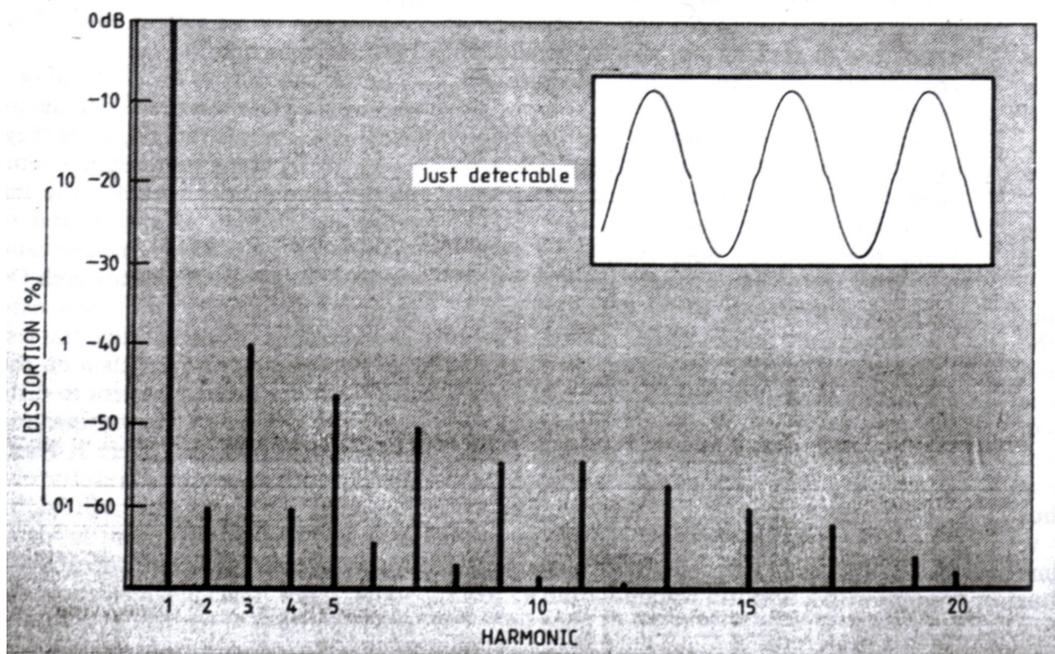


Figura 4.2.4.1: Estudo da distorção de cruzamento a partir de um analisador de banda fina.

[Moir, "Just Detectable" Distortion Levels, 1981]⁵

4.2.5. Conclusões Parciais

Avaliando os registros das investigações e naturalmente dando maior relevância aos dados mais recentes, parece que o nível realmente detectável não pode ser menor que 1%. Na verdade, em vista da natureza crítica dessa técnica (distorção suavemente ajustável e repetidas comparações no mesmo meio), é improvável que mesmo observadores experientes ouvindo a uma apresentação normal da amostra consigam perceber a adição de um centésimo de distorção ao sinal – soa razoável sugerir que o valor de *Fryer*, em torno de 3% de distorção, representa o nível realmente detectável na prática com limites na faixa entre 1% e 5%. Se a intenção for aplicar o máximo de rigor, o valor intrínseco ao circuito, 0,13% (bem abaixo do realmente detectável), poderá ser aceito como meta.

Com esses números em mente, é interessante ver como todas as outras partes de equipamento do sistema estão acima desse padrão. Os amplificadores são possivelmente os únicos componentes com um desempenho que excede confortavelmente o padrão realmente detectável: unidades de preço razoável podem introduzir distorções que não chegam a 1% (40 dB abaixo) com metade da sua potência de saída declarada; itens *high end*, ainda de uso doméstico, têm distorções entre 0,01% e 0,001% (60 a 80 dB abaixo). Por outro lado, gravações reproduzidas pelos melhores toca-discos chegam a deformações na faixa de 3% a 6%, sendo comum figurarem entre 8% e 10%.

Nos gravadores de bobina, essas deflexões estão entre 2% e 3%, mas a maior parte dos componentes da distorção são harmônicos de ordem ímpar; no geral seu conteúdo tem uma estrutura muito mais simples do que o espectro de distorção de um registro para gramofone. Nas gravações em cassete tem-se cerca do dobro do tamanho de máquinas de carretel, mas a variação entre itens nominalmente similares é muito maior. Sintonizadores de rádio típicos têm desvios entre 0,2% e 1% – na verdade uma transmissão ao vivo FM geralmente fornece a melhor qualidade disponível ao público.

Bons alto falantes monitores chegam a níveis sonoros em torno de 80 dB a 1 m com distorções em torno de 0,3% em médias frequências, crescendo para 1% a 2% no limite de graves da faixa de áudio. Portanto, os amplificadores são as únicas unidades em um sistema com distorção abaixo do limiar perceptível. Registros de gramofone aparecem no fundo da tabela de distorção, mas ainda vale complementar essa classificação com tecnologias digitais.

As disparidades inseridas por estágios de amplificação bem projetados estão tão abaixo do detectável e da distorção gerada por outras unidades do sistema que não parecem ter qualquer impacto sonoro na prática. De toda forma, é relativamente fácil aos projetistas obter tais baixos

níveis de distorção e como isso simplifica o trabalho nas outras etapas da cadeia, é ainda válido desenhar circuitos de baixíssima deformação.

Os níveis sugeridos como perceptíveis são bem maiores do que os comumente considerados aceitáveis, mas há pouca, se alguma, evidência de engenharia sugerindo que valores de distorção em torno de 0,1% são necessários. Deve-se lembrar que a distorção do sistema é percebida como um todo e que, quando ele inclui ligações a gravadores/reprodutores analógicos, por exemplo, o desvio estará na faixa de 2% e 3% mesmo com equipamento profissional (o pior desempenho atua como limitante).

Voltando ao ponto de abertura, é improvável que itens com níveis de distorção em torno de 0,01% sejam de alguma forma “mais limpos” do que aqueles com cerca de 0,1%, embora soem melhores no departamento de publicidade. Finalmente, deve ser observado que nesta discussão assumiram-se primárias as distorções não-lineares (componentes harmônicos e de intermodulação). A maioria, talvez todos, dos populares e exóticos fenômenos discutidos neste trabalho não são considerados significativos em equipamentos de padrão profissional e semi-profissional usados segundo a intenção do projetista.

4.3. MEDIÇÃO DE RUÍDO ELÉTRICO

À primeira vista, o problema da medição do ruído elétrico não se mostra diferente do de alcançar a coerência entre medições objetivas e opinião subjetiva acerca da intensidade ou do nível de incômodo de um ruído acústico simples. De toda forma, existe um grande número de padrões distintos, todos tentando resolver o problema, mas sempre com soluções diferentes – sugerindo dificuldades adicionais àquelas presentes na mera extração do volume da perturbação à saída do sistema. Discutir este aspecto é importante pelos resultados largamente discrepantes que resultam de técnicas especificadas em normas distintas de medição da correspondência entre sinal e ruído.

Abordagens baseadas na mensuração da potência ou da tensão características de um ruído elétrico foram provadas totalmente impróprias e descartadas há muito tempo. Falham porque a leitura crua desses índices ignora quatro outros fatores, que serão considerados individualmente – o primeiro sendo o efeito da relação sensibilidade/freqüência no sistema auditivo humano.

4.3.1. Relação Sensibilidade/Freqüência do Sistema Auditivo

É bem estabelecido que a sensibilidade do sistema auditivo não é uniforme ao longo da faixa de freqüências de áudio, caindo relativamente tanto em baixas freqüências quanto nas altas; como mostra a figura 4.3.1.1, fazendo referência às famosas curvas de mesmo volume de *Robinson e Dadson*: cada contorno denota a pressão acústica necessária para a obtenção subjetiva de um mesmo nível sonoro em cada ponto específico da faixa de áudio (as inclinações, positivas tanto nos graves quanto nos agudos, indicam que a sensibilidade é menor nos limites da banda).

E fazem ainda mais: esclarecem que a relação entre a intensidade sonora e o volume percebido varia com a intensidade absoluta. Assim, a 90 phon os níveis de pressão sonora necessários para alturas iguais a 100 e a 1000 Hz diferem por apenas 5 dB; a 30 phon requerem-se 15 dB a mais.

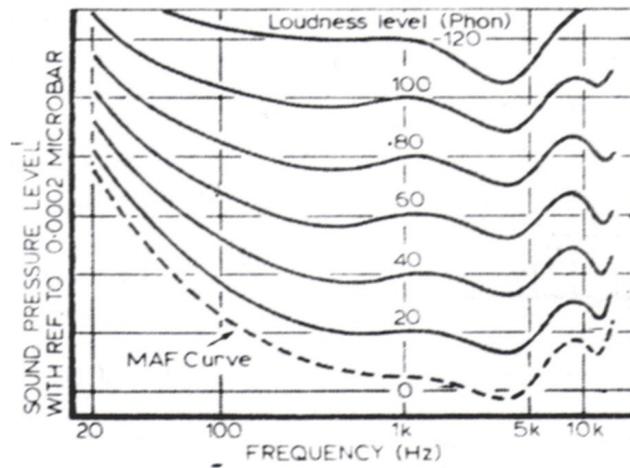


Figura 4.3.1.1: Curvas de volume de Robinson e Dadson.

[Moir, *Electrical Noise Measurement in Audio Engineering*, 1978]²⁸

Tais curvas particulares foram desenhadas especificamente sobre tons puros, mas são aproximadamente verdadeiras na mensuração de faixas de ruído, sendo válidas as mesmas conclusões. Ao medir a ruídosidade ou a altura do ruído, uma forma de se prevenir contra esse fenômeno é alterar a resposta em frequência do amplificador de medição do instrumento, corrigindo as variações na relação sensibilidade/frequência relativas ao nível absoluto de volume. A rede de ponderação trabalha usualmente em três estágios, nas já conhecidas curvas A, B e C – fornecidas em quase todos os medidores de nível sonoro (representadas na figura 4.3.1.2). Uma quarta curva é algumas vezes fornecida para medição em aviões a jato. Até agora, o problema não difere da mensuração do ruído acústico: a prática britânica (como especificado pelos padrões BS3860 e BS5428) emprega a curva de ponderação padronizada, geralmente a curva A. Há casos em que o contorno C, ou mesmo nenhum deles, tem de ser usado.

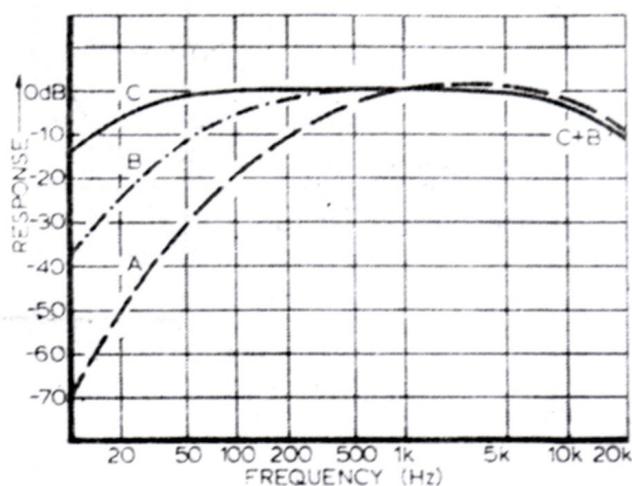


Figura 4.3.1.2: Curvas de ponderação A, B e C.

[Moir, *Electrical Noise Measurement in Audio Engineering*, 1978]²⁸

4.3.2. Resposta dos Transdutores

Um segundo aspecto merece consideração: ao avaliar o efeito acústico de um sinal elétrico, é preciso levar em conta a resposta do sistema transdutor. Até algumas décadas atrás, os únicos dispositivos relevantes na conversão do sinal elétrico em ruído acústico eram os telefones, de comportamento moderadamente uniforme apenas entre 300 e 3000 Hz. À medida em que o desempenho deles melhorou ao longo dos anos, a resposta em frequência da rede de ponderações foi alterada em estágios bem definidos, com os primeiros exemplos de curvas do ruído elétrico almejando duplicar a resposta dos aparelhos então em uso. Há numerosas variantes presentes nessas padronizações, com o contorno típico sendo o especificado pelo CCITT (Comitê Consultivo de Telefonia e Telegrafia Internacional) e mostrado na figura 4.3.2.1.

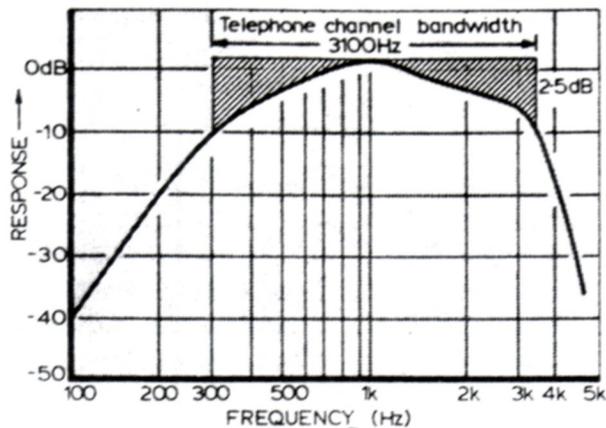


Figura 4.3.2.1: Curva de ponderações típica definida pela CCITT.
[Moir, *Electrical Noise Measurement in Audio Engineering*, 1978]²⁸

Com o advento da transmissão e do desenvolvimento nos sistemas alto falantes de respostas substancialmente uniformes entre 20 e 20000 Hz, fez-se necessária uma grande mudança no formato da curva de ponderações para melhorar a coerência entre as ruidosidades eletricamente medidas e aquelas subjetivamente avaliadas. As primeiras relações, representadas na figura 4.3.1.2, ignoravam completamente a contribuição dos “assobios”, componentes de alta frequência dos sinais de ruído elétrico (subjetivamente muito incômodos). Em um amplificador bem projetado, o ruído básico é dado pela agitação térmica no componente resistivo da impedância de entrada do circuito; seu valor pode ser calculado a partir da equação de *Nyquist*, a partir da qual se vê que a potência do ruído é constante por unidade de largura de banda. Quando medido por um analisador com as características usuais de largura de banda de porcentagem constante, o espectro é tipicamente o apresentado na figura 4.3.2.2. Qualquer contorno terá logicamente de refletir a predominância das componentes de alta frequência no ruído encontrado em amplificadores e sistemas de telefone.

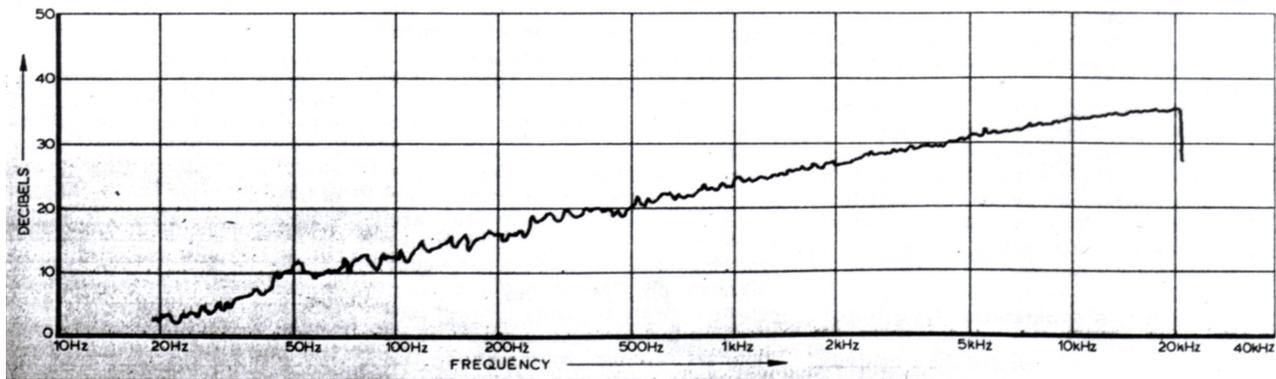


Figura 4.3.2.2: Espectro de freqüências típico do ruído branco.
 [Moir, *Electrical Noise Measurement in Audio Engineering*, 1978]²⁸

4.3.3. Efeitos Mascaradores

James Moir aponta, em seu artigo *Electrical Noise Measurement in Audio Engineering*, por sua própria experiência, que “a mera extensão da largura de banda na relação de ponderação era insuficiente para trazer à coerência medições objetivas e opinião subjetiva”²⁸. O ruído não pode ser ouvido isoladamente como no estudo das perturbações acústicas; fica, em vez disso, como pano de fundo em amostras musicais e de fala (ambas com picos de energia em freqüências baixas e médias). Salvo intervalos sonoros, qualquer perturbação acústica de componentes graves ou médios do ruído elétrico é mascarada pelas parcelas do sinal da amostra na mesma faixa. Entretanto, sendo característica do ruído elétrico a concentração energética nos agudos enquanto na amostra a energia diminui por oitava com a freqüência crescente, percebem-se componentes “assobiantes” do ruído com mais incômodo do que as outras. Para reduzir o impacto, é comum aumentar a sensibilidade do medidor nas freqüências mais elevadas.

4.3.4. Ruído Intermitente

O ruído branco é um tipo bastante conhecido e particularmente suave, mas muitos não têm tal característica: a interferência de diversos equipamentos elétricos é caracteristicamente intermitente, ou “espinhosa”, mais desconfortável por unidade de potência. Podem ser colocados pontos similares sobre muitas outras formas de interferência, comuns em circuitos de transmissão; a variedade é tanta que não surpreende os esforços mais relevantes em prol de uma curva de ponderação de ruído universalmente aceita serem baseados em abordagens experimentais.

4.3.5. Curvas de Ponderação

Os experimentos apresentados por *James Moir* empregaram painéis de ouvintes para avaliar a intrusividade de diversos tipos de ruído sob amostras sonoras, com a relação dando origem a uma curva de ponderações que considera todos os quatro aspectos do problema (resultado presente na recomendação 468 do IEC e mostrado na figura 4.3.5.1). Vê-se um contorno de inclinação uniforme, cerca de 6 dB por oitava, abaixo de 4 kHz, subindo para um pico de cerca de 12 dB entre 7 e 8 kHz e caindo muito rapidamente acima desta freqüência. As ponderações reduzem a contribuição das componentes graves no nível de ruído total medido e enfatizam parcelas “assobiantes” (entre 5 e 10 kHz).

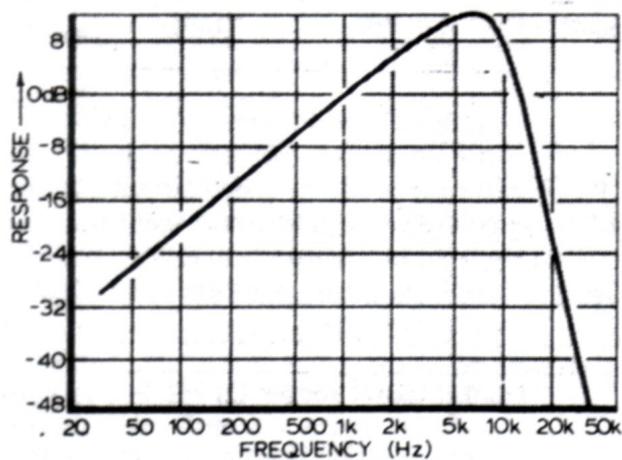


Figura 4.3.5.1: Curva de ponderações dada pela recomendação 468 da IEC.

[Moir, *Electrical Noise Measurement in Audio Engineering*, 1978]²⁸

4.3.6. Características de Medição

Duas outras características do equipamento de mensuração precisam ser levadas em conta na análise do desempenho do instrumento e do circuito que o move. Negligenciando a abordagem digital, todos os instrumentos de ponteiro empregados em medições de ruídos são basicamente bobinas móveis de corrente contínua precedidas por um sistema retificador que converte o sinal de tensão de saída do amplificador de ponderação em corrente contínua; tais circuitos podem ser desenhados para produzir correntes de medição proporcionais à média, ao RMS, ao pico ou a qualquer valor intermediário da diferença de potencial aplicada. Na prática britânica, conforme exemplificado pela BS3860, ou na européia, coberta pela IEC268-3,

especifica-se uma medida com leituras proporcionais ao valor RMS para mensurar sinais senoidais (é o usado em estudos de nível sonoro convencionais, indo de encontro à BS4197).

Segundo *James Moir*²⁸, experiência e experimentos parecem indicar que os frutos mais incômodos de um ruído intermitente ou de variações bruscas têm proporção mais uniforme em relação ao valor de pico do que ao RMS; incluindo este efeito, o sistema alemão DIN45-450 e a recomendação IEX 468 especificam o uso de um circuito de leitura quase-pico para reger o movimento de medição.

De toda forma, a deflexão final depende também da balística desse deslocamento sobre a escala, pois uma translação pesada e preguiçosa pode não indicar o valor de pico ou quase-pico a menos que o sinal seja continuamente repetitivo. Assim, é também preciso especificar a balística da medição, algo usualmente feito por uma tabela listando a fração da deflexão final atingida por pulsos de diversos comprimentos.

Sendo uma situação bastante confusa, vale apresentar algumas conseqüências práticas: se o ruído a ser medido é um simples sinal senoidal de única freqüência, mensurações seguindo qualquer um dos padrões irão sem dúvidas ter a mesma leitura; é indiferente a corrente de medição ser proporcional à média, ao RMS ou ao valor de pico da tensão aplicada, visto que a escala é calibrável em qualquer parâmetro e nesse caso eles têm relações fixas entre si.

Quando o estudo do ruído é feito em deformações mais conhecidas, como a branca o a rosa, as relações entre a média, o RMS e o quase-pico podem também serem especificadas com boa acurácia. Por outro lado, em composições desconhecidas, a correspondência entre as leituras dos diversos tipos de medições não pode ser especificada com precisão, sendo necessário explicitar o padrão ao qual o instrumento está adequado ao mencionar o valor de quaisquer tensões coletadas.

Em amplificadores bem projetados, a perturbação residual deve ser toda por conta da agitação térmica na componente resistiva da impedância de entrada e precisa possuir, assim como o ruído branco, uniformidade na distribuição da energia por ciclo. Poucos são tão perfeitos assim, observando-se sempre componentes adicionais, proporcionais a $1/f$, além de contribuições das freqüências dos principais harmônicos e das deformações presentes na faixa de agudos (de maior destaque).

A tabela 4.3.6.1 lista as relações aproximadas entre instrumentos de características de ponderação especificadas para os mais importantes padrões correntes quando usados na medição de vários tipos de ruídos; as últimas linhas são os valores médios das leituras nos terminais de saída de diversos amplificadores e gravadores de fita de alta qualidade. O valor de referência foi extraído de um medidor de nível sonoro padrão com a curva de ponderação A para o

BS4197 conectado em paralelo. Tais relações devem ser usadas apenas como guia aproximado, visto que não foi avaliado o espectro de frequências do ruído nas saídas do amplificador nem do gravador de fitas. De toda forma, como foi extraída a média das leituras para diversos modelos diferentes, as relações podem ser consideradas típicas.

Tabela 4.3.6.1: Relação aproximada entre as ponderações “A” e 468-1.

[Moir, *Electrical Noise Measurement in Audio Engineering*, 1978]²⁸

| Tipo de Ruído | Ponderação “A” | Medida RMS 468-1 | Medida Ponderada Quase-Pico |
|---------------------|----------------|------------------|-----------------------------|
| <i>Branco</i> | 0 | + 8.5 | + 12 |
| <i>Rosa</i> | 0 | + 6.0 | + 11 |
| <i>Fita</i> | 0 | + 7.0 | + 12 |
| <i>Amplificador</i> | 0 | + 8.5 | + 12 |

Foi apontado anteriormente que uma medição precisa do ruído elétrico era importante pela sua aplicação no estabelecimento de índices das relações sinal/ruído. Avaliando um sistema, o sinal de tensão de teste é quase invariavelmente uma simples senóide de única frequência e há pouca ambigüidade quando a sua mensuração. Leituras do ruído residual na ausência de um sinal de entrada oscilam até entre 10 e 12 dB dependendo do medidor e da rede de ponderações empregada; os dados serão, em quase todas as situações, maiores do que os obtidos por um medidor de nível sonoro ponderado em A, no BS4197, conectado em paralelo, e, por consequência, a relação sinal/ruído será menor pelas quantidades grosseiramente indicadas nos valores citados na tabela 4.3.6.1.

4.3.7. Conclusões Parciais

Em uma situação que dificilmente pode ser considerada cristalina, há a complicação adicional de que os medidores de ruído comerciais estão disponíveis de acordo com apenas um padrão, embora possam ser feitas leituras em RMS ou do pico da amostra (de acordo com a BS4297). Exemplos de instrumentos comerciais que seguem o IEC468-1 são o *Brüel & Kjaer* tipo 2429 e o psfômetro *Rhode & Schwarz* tipo UPGR; ambos fornecem opções chaveáveis em RMS e detectores quase-pico, empregando medições de acordo com as especificações balísticas do IEC268-2. Citações de relações sinal/ruído devem sempre ser vistas com grande suspeita a menos que a rotina de medição seja definida, preferencialmente com referência explícita a padrões científicos.

4.4. DESLOCAMENTOS DE FASE EM ALTO FALANTES

Sabe-se de longa data que a maioria dos alto falantes têm relação fase/freqüência não uniforme e a audibilidade dos deslocamentos de fase é comumente alvo de debates na esfera da literatura especializada. *H. D. Harwood*, em seu artigo *Audibility of Phase Effects in Loudspeakers*⁹, de 1976, ao criticar fabricantes da época por venderem produtos nos quais declaram atenção especial à resposta fase/freqüência aludindo a melhorias no desempenho audível, forneceu vastas análises no assunto e seus experimentos serão tomados como referência nesta parte do trabalho. O estudo em si segue sobre dois aspectos: o da qualidade sonora e o da formação da imagem estereofônica.

4.4.1. Primeiras Impressões em Qualidade Sonora

Seguindo inicialmente o critério da excelência sonora, é lugar comum declarar que a polaridade da conexão de um falante não tem efeito praticamente nenhum. Certos observadores dizem-se capazes de perceber tais mudanças em amostras específicas, mas (mesmo tomando isso como verdadeiro) o impacto é tão pequeno que nenhum fabricante de discos, captadores ou alto falantes considera válido o esforço de especificar uma polaridade correta. Em acréscimo, produtores musicais também não têm porquê para se incomodarem com pólos na mixagem das saídas de captadores de diversos microfones em amostras leves. Um resultado impressionante à primeira vista, dado que uma onda de áudio é sabidamente assimétrica e não é nada trivial a polaridade ter tão pouco efeito sobre sons como o do repique de uma bateria.

Essa sutileza através da banda de áudio pode ser confirmada trocando-se a fase relativa da saída de um falante com dois filtros passa-tudo, sendo assim possíveis testes A/B com apenas um alto falante: em circuitos construídos com os cuidados adequados quanto a distorções de fase e amplitude, o efeito é absolutamente imperceptível. Nos anos setenta o Departamento de Pesquisas da BBC fez a mesma verificação com falantes de alta qualidade e diversos tipos de amostras sonoras (uma sonata para violino e piano, discursos informais com vozes misturadas, uma pequena orquestra, um coral e uma orquestra sinfônica). Em análises desse rigor é vital manter a resposta em amplitude sob limites bastante rígidos e a distorção por não-linearidade em baixa ordem para que tais fatores, muitas vezes desconsiderados, não invalidem o experimento como um todo. Foram avaliados os efeitos sobre a qualidade sonora em toda a banda de áudio de deslocamentos de 90°, 60° e 30° e em nenhum caso produziu-se qualquer efeito audível.

Nesse estudo do deslocamento relativo, a mudança absoluta da fase foi sempre muito maior e variou suavemente com a frequência, conforme mostra a figura 4.4.1.1. A defasagem entre 30 Hz e 10 kHz é da ordem de 500° e ainda assim não há efeito sobre a qualidade sonora. Isso não corresponde sequer a um simples atraso de tempo: o *delay* nos graves é em torno de 6 ms, enquanto nos agudos temos aproximadamente 0,15 ms.

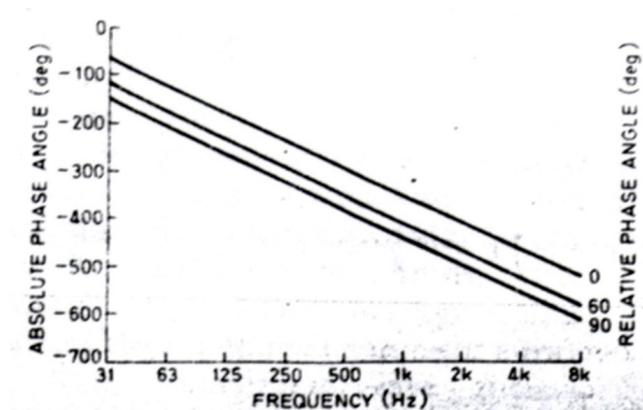


Figura 4.4.1.1: Curva de resposta fase/freqüência absoluta do filtro passa-tudo usado no experimento.
 [Harwood, *Audibility of Phase Effects in Loudspeakers*, 1976]⁹

4.4.2. Formas de Onda Artificiais

B. B. Bauer²⁹ confirmou a inaudibilidade dessas mudanças, embora em seu artigo *Audibility of Phase Distortion* mostre claramente que sinais retangulares sofrem distorções significativas em suas formas de onda sob tais condições (assim a necessidade de reprodução precisa de ondas quadradas por alto falantes é também posta em cheque). Conclui-se que a qualidade sonora não será afetada por deslocamentos de fase fixos e nem por aqueles que variarem suavemente dentro da faixa de resposta padrão. É possível que tais mudanças, quando produzidas por instrumentos de sopro muito longos, possam gerar efeitos audíveis, mas até o uso deles é bastante raro.

Avaliando, em contraste, as conseqüências de rápidas mudanças locais de fase sobre a qualidade sonora, inúmeros estudiosos, como Boer, Craig e Jeffress^{30,31}, mostraram que sinais artificiais (em sua essência, intensas defasagens locais) produzem efeitos audíveis. As condições necessárias à perceptibilidade não são claras; exceto talvez pela sugestão de autores como Goldstein³² de que a diferença entre um sinal modulado por amplitude e um por freqüência (distintos somente no que concerne à fase) é audível apenas dentro da largura de banda crítica na correspondente freqüência de portadora.

Por outro lado, o exame da percepção de picos ressonantes com diversos fatores de qualidade e frequências de mínimo deslocamento de fase feito por *Harwood*⁹ mostrou que sob certas condições a audibilidade de um determinado cume de fato decrescia com o aumento do fator de qualidade; ou seja, enquanto a taxa de mudança de fase aumentava. Esse surpreendente resultado, assim que confirmado por *Moulana*³³, veio acompanhado pela demonstração de que se ouvia aí a condição de estado estacionário. Revertendo a fase do canal ressonante com relação à do direto foi possível (ajustando-se o nível do sinal no circuito ressonante) o cancelamento da coloração de tal forma que o efeito da ressonância fosse inaudível. Um cancelamento assim pode apenas ocorrer na condição estacionária (a resposta no tempo não pode ser anulada). Nessa situação os efeitos de fase são obviamente inaudíveis.

Recebeu também considerável atenção a anomalia em que, sob outras condições novamente não especificadas, chegava-se precisamente à conclusão oposta – de que a audibilidade em um pico ressonante de certo nível crescia com o aumento do fator de qualidade. Quer nesse caso mencionado a mudança de fase ou a resposta audível da amplitude no tempo sejam tomadas como irrelevantes (dado que nessas redes ambas estão irrevogavelmente relacionadas), por outro lado ao excitar um elemento ressonante simples como um diapasão a audibilidade claramente cai com a amplitude, sem acompanhar as constantes mudanças de fase.

4.4.3. Vales de Interferência

É também de comum observação que vales finos de interferência são inaudíveis. Por sua própria natureza eles contêm mudanças de fase bastante bruscas (assim como as mais óbvias alterações de amplitude), mas elas parecem não ter efeito nenhum sobre a qualidade sonora. Um exemplo interessante foi testado pelo Departamento de Pesquisas da BBC por *P. C. J. Hill* junto a outra investigação – a curva da resposta amplitude/frequência do circuito usado é mostrada na figura 4.4.3.1. Limitou-se a largura de banda a 6 kHz por razões ligadas ao experimento original e a saída foi comparada a uma amostra inalterada restrita à mesma faixa de frequências. Avaliando gravações de voz, músicas com piano e dançantes com uma nota subjetiva entre um e cinco associada a cada uma (com uma unidade representando “um pouco abaixo do padrão”), as pontuações obtidas foram 0,6 para a fala, 0,8 para o piano e 0,3 na música dançante: o resultado concreto é que o impacto geral das distorções por efeitos casados de fase e amplitude foram desprezíveis, ainda que a resposta em fase tenha sido bastante irregular.

Novamente, ninguém se opõe a ouvir um espetáculo em um auditório, ainda que os efeitos das primeiras reflexões e da frequência estacionária da estrutura sobre a fase do sinal sejam

devastadores e variem rapidamente com a posição da fonte ou do ouvinte. Nem mesmo mudanças apreciáveis na posição da cabeça têm qualquer impacto audível.

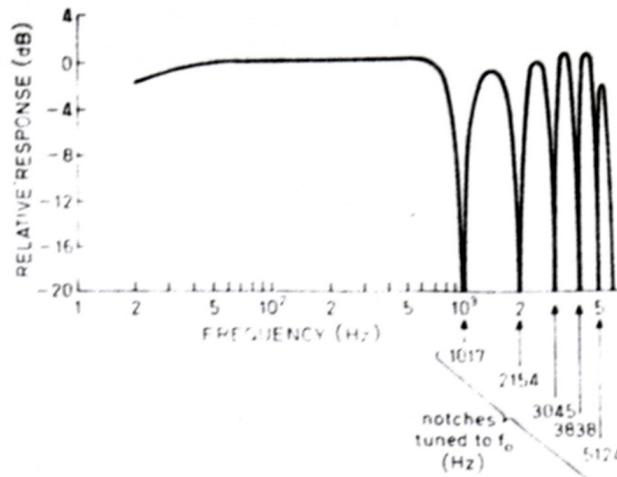


Figura 4.4.3.1: Curva de resposta amplitude/freqüência do circuito usado no experimento de Hill.

[Harwood, *Audibility of Phase Effects in Loudspeakers*, 1976]⁹

4.4.4. Limites do Fator de Qualidade

Focando a condição de constantes internas com altos fatores de qualidade, a questão passa a ser o limite da taxa de mudança de fase que ainda é inaudível. *Harwood*⁹, por exemplo, julgava necessário extinguir as redes de cruzamento de segunda e terceira ordens para eliminar a coloração sonora; entretanto as freqüências de cruzamento serão completamente inaudíveis com um amortecimento adequado, mesmo na comparação direta com as amostras originais. Tal condição parece ser todo o subjetivamente necessário mesmo com defasagens consideráveis.

O falante de monitoramento usado na montagem foi do tipo LS5/5, conhecido por uma qualidade sonora da mais alta ordem – sua resposta em fase, medida a um metro de distância, é mostrada na curva (a) da figura 4.4.4.1. Trata-se de um projeto de três unidades com freqüências de cruzamento em 400 Hz e 3 kHz. A irregularidade de fase é pequena apenas na primeira freqüência, com a unidade de agudos ficando acusticamente à frente da de médios, embora mecanicamente as superfícies frontais das três estejam contidas no mesmo plano. A despeito do descompasso, não se percebe nenhum tipo de degeneração sonora nessa região.

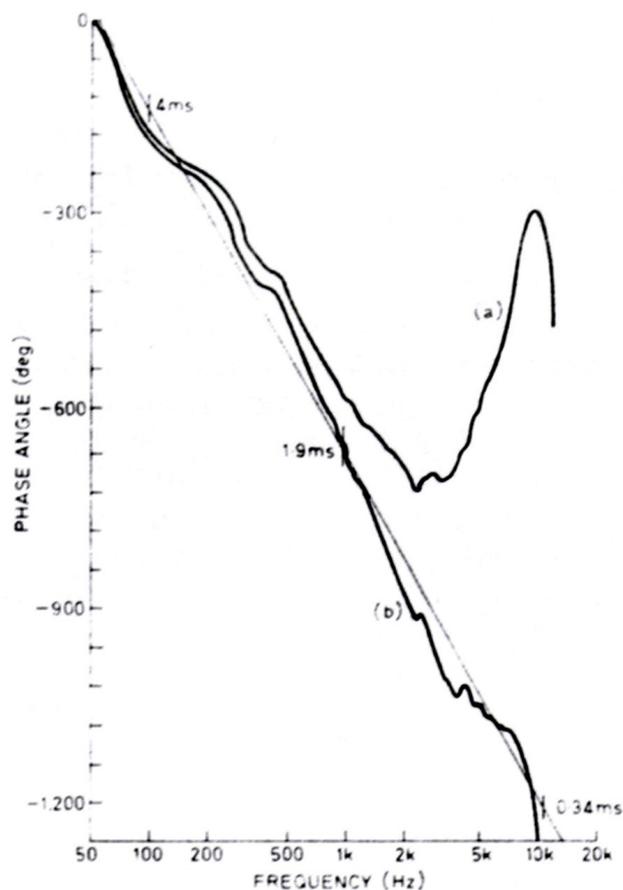


Figura 4.4.4.1: (a) Curva de resposta fase/freqüência do falante monitor tipo LS5/5 e (b) resposta em fase do sistema com um atraso de 0,25 ms. [Harwood, *Audibility of Phase Effects in Loudspeakers*, 1976]⁹

Um atraso de 0,25 ms sobre o alto falante remove significativamente a deflexão mostrada na curva (a) da figura 4.4.4.1, resultado representado na (b). O comportamento passa então a ser grosseiramente linear, o que já se mostrou inaudível. Mesmo um aumento na distância para o ouvinte de aproximadamente três polegadas sobre o eixo do alto falante não produz alterações perceptíveis, confirmando a natureza inócua do primeiro contorno. Expõe-se assim também a falta de senso por trás de curvas de fase absolutas, visto que pequenos atrasos de tempo alteram significativamente seu formato. Caso, por outro lado, o deslocamento temporal fosse positivo, a adição geraria uma distorção vertical – a curva da relação atraso de tempo/freqüência está na figura 4.4.4.2. Fica claro que este é não um formato nocivo.

Seguindo a analogia usada por *Harwood*, a situação dos impactos de deslocamentos de fase sobre a qualidade sonora é como a de uma senhora velha em sua primeira viagem de avião. Algum tempo após a decolagem ela olha pela janela e percebe que as asas balançam para cima e para baixo. Chamando o comissário de vôo, diz que o avião não é seguro e exige que o aterrise. Ele garante que está tudo em ordem e fecha sua janela, perguntando então se a mulher ainda sentia quaisquer efeitos por conta do movimento das asas. Ela diz que não e fica bastante feliz.

No que se refere aos malefícios das defasagens sobre a excelência do som, até que alguém os demonstre audíveis em amostras sonoras reais (em contraposição aos sinais artificiais), prossegue-se fechando a janela e assumindo que tal fator não existe.

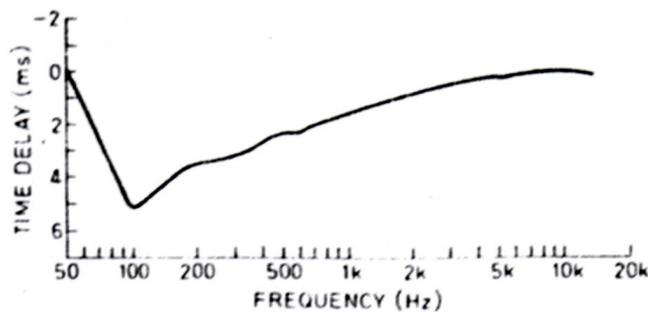


Figura 4.4.4.2: Correspondência entre o atraso de tempo axial e a frequência no alto falante do tipo LS5/5. [Harwood, *Audibility of Phase Effects in Loudspeakers*, 1976]⁹

4.4.5. Formação da Imagem Estereofônica

O segundo aspecto da fase em relação aos alto falantes está ligado à formação das imagens estereofônicas. Aqui têm-se ainda mais vincos do que no que concerne à qualidade sonora, dado que são simplesmente desconhecidos os fatores necessários para determinar a definição de uma imagem.

À primeira vista parece que se os dois alto falantes de um par forem idênticos nas respostas em fase e amplitude a definição da imagem não dependerá do quão uniforme com relação à frequência qualquer uma dessas características seja. Na prática não é tão simples: pares de tipos diferentes de falantes, mesmo quando casados quanto à relação amplitude/frequência, não têm a mesma definição de imagem nem a um ouvinte posicionado simetricamente. Nos experimentos de *Harwood* foram usadas as mesmas unidades de graves e agudos em dois projetos distintos de duas unidades cada: um empregando-as em linha vertical e na outra disposição os *tweeters* foram postos no centro da unidade de baixas frequências (por um painel perfurado). O último foi considerado por usuários como tendo propriedades de formação de imagem apreciavelmente melhores do que na distribuição em linha, mesmo ambos consistindo das mesmas unidades e tendo redes de cruzamento similares. Para mostrar que a superioridade não é mero fruto da disposição concêntrica, um projeto posterior³⁴, com três unidades em linha vertical, entregava uma imagem ainda mais definida – é esse o alto falante cuja relação fase/frequência foi mostrada na curva (a).

Em outro estudo⁹ foi inserido um filtro defasador (o mesmo cuja resposta foi mostrada na figura 4.4.4.1) em série com cada um dos alto falantes tipo LS5/5, determinando-se os impactos sobre a definição da imagem central e, trabalhando também com tempos de atraso variáveis, eventuais aberrações cromáticas sobre amostras de voz masculina. Nenhum efeito foi detectado mesmo em testes A/B. Com isso, permanece inexplicável como o uso de um circuito de linearização da relação fase/freqüência possa melhorar a largura da imagem.

Vale a pena considerar um artigo publicado por *Hardwood*³⁵ alguns anos antes do experimento, em que ele mostra que a largura para uma imagem central formada a partir de dois alto falantes é na verdade mais estreita em ambientes de campo difuso do que em condições de campo livre. A única explicação óbvia é que a reflexão no chão dentro do ambiente de campo difuso ajuda na detecção da direção da fonte aparente.

Em testes de campo livre, usuários reclamaram que a imagem estereofônica era bem mais difusa do que a que eles estavam acostumados usando os mesmos alto-falantes em auditórios normais. Sugeriu-se então a colocação de uma placa maciça de seis milímetros no ambiente de campo livre e eles ficaram satisfeitos. O eixo acústico dos falantes estava a cerca de um metro do chão e, se a distância dos observadores aos falantes era de dois, então (assumindo simplificadoramente nenhuma mudança de fase na reflexão sobre o solo) haverá um vale de interferência nos tímpanos dos ouvintes a 115 Hz e em intervalos de 230 Hz em diante. Irregularidades de fase correspondentes a interferências assim devem ser bem significativas; mas, longe de destruírem a imagem estereofônica, parecem na verdade auxiliar na melhoria de sua definição. Isso levanta a interessante questão de se a resposta em amplitude do alto-falante a, digamos, -45° no plano vertical, comumente ignorada, deve ser levada em consideração.

Mesmo que eventualmente sejam descobertos efeitos de segunda ordem na formação da imagem gerados pela defasagem do sinal, é difícil imaginar como eles poderiam ser relevantes acima de cerca de 2 kHz: estudos psicoacústicos sobre a estereofonia mostram que a fase relativa entre os sinais é importante apenas até perto dessa freqüência; acima desse nível o ouvido usa o envelope do sinal em vez da fase absoluta. É por isso que, novamente, é extremamente descabido supor que a produção de um alto falante de fase linear traga de alguma melhoria na formação da imagem estereofônica (ao menos acima de 2 kHz).

Outros experimentos conduzidos por *Harwood*³⁵ sobre a largura de imagem em diferentes projetos de alto falantes mostraram que, usando uma voz masculina como fonte sonora, esse parâmetro (por larga faixa de material) percebe valores menores do que os obtidos em qualquer banda de uma oitava do mesmo material, indicando que o cérebro faça algum somatório da informação assimilada. Não se tomou conhecimento de conclusões formais desses estudos – fica a alusão a fatores psíquicos potencialmente relevantes que não foram considerados aqui.

4.4.6. Conclusões Parciais

Quaisquer impactos de deslocamentos de fase (de banda larga ou estreita) sobre a qualidade sonora são no máximo de segunda ordem e certamente mínimos comparados a efeitos de primeira como a coloração. Nessa linha podem ser ignorados por projetistas de alto falantes e por usuários (ainda que talvez não por estudiosos de psicoacústica). Até que, enfim, seja provado que os efeitos de fase dessa natureza afetam a excelência audível em amostras reais (e não apenas em sinais altamente artificiais), o tratamento apropriado parece ser fechar a janela e agir como se a fase, para tais aplicações, não existisse. Quanto à formação da imagem estereofônica, é preciso admitir o atual estado de ignorância de todos os fatores envolvidos, mas, tendo em vista o material apresentado, deixar os ouvidos abertos aos fabricantes – e, até que se demonstre algum comportamento perceptível, permanecer com certa ansiedade (ainda que ela esteja acompanhada da indiferença).

5. CONCLUSÕES

Dentro do caminho do sinal de áudio (tanto o elétrico como sua posterior conversão sonora), não é novidade um amplificador apresentar imperfeições abaixo da resolução do ouvido humano. Apesar dos diversos esforços para reverter tal situação, a leitura de um indicador de desempenho não transmite sua relevância absoluta, reservando a poucos a capacidade de interpretá-los – o que, por sua vez, depende mais da convicção do discurso do que nível de embasamento na asserção.

É uma tarefa extremamente complexa estabelecer indicadores abrangentes quando o referencial em si (nosso sistema auditivo) passa constantemente por refinamentos em seu modelo matemático. Deixando de lado esta importante tarefa, a psicoacústica já sinaliza há décadas as linhas gerais de operação do ouvido humano, permitindo sem grandes imprecisões a contextualização dos indicadores convencionais; algo que, embora trivial, é raramente considerado com a devida profundidade na literatura especializada.

O projetista de circuitos de áudio não se pode alienar em avanços comparativos de desempenho: precisa compreender as especificidades do setor para, além de focar seus esforços em melhorias perceptíveis, fazer frente à inércia atual, que confunde o público alheio à alçada técnica, mantendo acesas velhas controvérsias e reduzindo as avaliações à expressão de preferências pessoais, quadro válido apenas na qualificação de interfaces, desenhos gráficos ou fora do escopo da alta fidelidade (como em equipamentos musicais).

Um exemplo bastante recente, que apareceu durante a formulação deste trabalho, a empresa brasileira *Tecniforte*, pioneira na construção de cabos para áudio, lançou em outubro de 2009 sua nova linha para instrumentos musicais, a *Prata Pura*. A antecessora, chamada *High Clear*, já tinha reforços construtivos mais que suficientes: duplas camadas de blindagem e emborrachamento, produção semi-automatizada (garantindo que qualidade era reprodutível) e resina industrial preenchendo a cápsula dos pluges, aumentando a resistência à tração.

A diferença é a substituição do núcleo de condução, originalmente cobre com alto nível de pureza, por um de prata, aludindo a uma melhoria na qualidade sonora pela condutividade superior do metal nobre. Não bastasse a confusão causada por um avanço tão contestável (ambas estão à venda a preços seletivamente distintos), a edição brasileira da revista *Guitar Player* publicou no mesmo mês uma resenha em que o repórter *Jaques Molina* declara: “comparado a cabos convencionais da própria *Tecniforte* e outros fabricantes consagrados, o *Prata Pura* apresenta principalmente uma melhoria nos graves, que ficam um pouco mais

definidos (...) é um cabo excelente, que oferece um som muito refinado e pode ser indicado para vários estilos igualmente refinados, como *jazz* e *blues*³⁶.

Não há indícios de que nem mesmo um simples teste cego tenha sido feito, algo que ainda assim pode acarretar graves erros se mal conduzido. Avaliar qualidades supostamente distintas sem os devidos cuidados quanto à influência de efeitos psicológicos é uma irresponsabilidade infantil, que presta um grande desserviço aos consumidores – e infelizmente está longe de ser uma má conduta isolada. Quanto à empresa, é difícil fazer um julgamento: melhoraram a resposta do sistema e apenas aludiram a aprimoramentos no desempenho sonoro (ganhando um nicho de mercado de maior poder de compra e refinadamente mal informado). A falta de detalhes técnicos em um tópico tão polêmico dentro da esfera técnica é no mínimo uma postura anti-ética, que passa despercebida justamente por ser comum.

Os pontos expostos neste trabalho não surpreendem um engenheiro com experiência na área de áudio (que, no pior caso, tirou conclusões semelhantes em seus experimentos), mas nas poucas fontes dentro da literatura especializada em que se apresentaram linhas semelhantes, o caráter é introdutório e, sem o devido aprofundamento e exposição de experimentos, não servem à formação do projetista aspirante, que freqüentemente comete o erro de encarar o áudio como o tratamento de sinais convencional em Engenharia Elétrica, em que a interface final é um osciloscópio ou um computador.

APÊNDICE

Carta Sobre Padrões de Medição Desenvolvidos por Fabricantes

Preparando este artigo²⁸ em mensuração de ruído, uma situação já confusa foi então complicada pela publicação de um artigo da Sociedade de Engenharia de Áudio (pré-impressão 1353 da AES) por *Dolby, Robinson e Gundry* fornecendo detalhes de um novo padrão para medidas de ruído. A intenção é inicialmente o uso em campos como a gravação em fita, em que o ruído a ser mensurado não inclui quantidades significativas de energia em pulsos transientes abruptos.

As medidas e constantes de tempo de circuito especificadas pelos padrões 468-1 e pela 468-2 da CCIR (*Comité Consultatif International pour la Radio*) têm características quase-pico com para garantir que a leitura represente adequadamente os sinais de ruído com efeitos curtos dentro do transiente, mas um medidor assim é caro. *Dolby* sugere uma combinação de medidas que inclui a rede de ponderações de frequências da CCIR 468-1 em conjunção com um medidor de deflexão proporcional à tensão média ($0,636 \times$ pico), fornecendo leituras infelizes que, até no ruído típico de fitas, são cerca de 6 dB menores do que as com um medidor quase-pico da CCIR. Como correção, agora recomendam que a frequência de referência seja deslocada de 1 kHz para 2 kHz.

As vantagens de um instrumento assim são largamente comerciais. Um sistema de medição de ruído pode ser produzido pela adição de uma rede de ponderação de frequências à frente de qualquer qualquer multímetro e a organização *Dolby* tem uma estrutura de ponderações assim à disposição (número de catálogo 98A). Padronizaram o instrumento para uso em todas as discussões técnicas entre si e suas diversas licenciadas, estando em uma posição poderosa para influenciar o mercado. As reduções de custo são consideráveis, pois a rede é vendida a £ 145 e deve haver poucos laboratórios sem o milivoltímetro que a montagem demanda. Instrumentos de acordo com a CCIR 468-1 ou 468-2 são vendidos em torno de £ 800 e £ 1000.

Os prejuízos são igualmente óbvios. Mais um padrão com relação ao qual as medições de ruído podem ser feitas e como as leituras obtidas dependem do espectro de frequência do ruído – informação que não está usualmente disponível – há chances significativas de se obterem leituras “erradas” sem que isso esteja visível ao usuário.

É difícil definir uma opinião consensual. O custo dos medidores existentes não tem nenhuma relevância para usuários mais profissionais, como organizações de transmissão e telecomunicações. Fabricantes de equipamentos de áudio, por outro lado, não têm tal vantagem financeira e possivelmente favorecerão os propósitos da *Dolby*, que têm em acréscimo o ganho comercial de fornecer menores leituras no “ruído espinhoso”, aumentando o um valor da relação sinal/ruído medida. Essas propostas corporativas podem dividir o setor agudamente em dois grupos: os profissionais, que continuarão a usar seus medidores nos padrões CCIR 468-1 e 468-2, e as organizações de produtos para o consumidor, inclinadas a adotar um sistema de medição segundo as intenções da *Dolby*. Apenas uma exposição de longo termo às forças de mercado fará a situação mais clara.

James Moir, 1978.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SELF, D. *Audio Power Amplifier Design*. 4. ed. Grã-Bretanha: Newnes, 2006. 461 p.
2. RANDI, J. *Flim-Flam! Psychics: ESP unicorns and other delusions*. Grã-Bretanha: Prometheus Books, 1982. 342 p.
3. HARRIS, J. D. Loudness discrimination. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, v. 11, p. 1–63, 1968.
4. MOORE, B. C. J. Relation between the critical bandwidth and the frequency-difference limen. *Journal of the Acoustic Society of America*, v.55, p. 359, 1974.
5. MOIR, J. 'Just detectable' distortion levels. *Wireless World*, p. 32–34, fev. 1981.
6. HAWKSFORD, M. The Essex echo. *Hi-fi News & Record Review*, p. 53, mai. 1986.
7. SELF, D. Ultra-low-noise amplifiers & granularity distortion. *Journal of the Audio Engineering Society*, p. 907–915, nov. 1987.
8. LIPSHITZ, S. P. On the audibility of midrange phase distortion in audio systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, p. 580–595, set. 1982.
9. HARWOOD, H. Audibility of Phase Effects in Loudspeakers: are 'linear phase' loudspeakers a gimmick? *Wireless World*, p. 30–32, jan. 1976.
10. KING, G. Hi-fi reviewing. *Hi-fi News & Record Review*, p. 77, mai. 1978.
11. HARLEY, R. Review of Cary CAD-300SEI single-ended triode amplifier. *Stereophile*, p. 141, set. 1995.
12. BELCHER, R. A. A new distortion measurement. *Wireless World*, p. 36–41, mai. 1978.
13. BAXANDALL, P. J. Audible amplifier distortion is not a mystery. *Wireless World*, p. 63–66, nov. 1977.
14. HAFLE, D. A listening test for amplifier distortion. *Hi-fi News & Record Review*, p. 25–29, nov. 1986.
15. COLLOMS, M. Hafler XL-280 test. *Hi-fi News & Record Review*, p. 65–67, jun. 1987.
16. JONES, D. K. *A Subjective Investigation into Preferred Microphone Balances*. Monografia de engenharia da BBC nº 68, jul. 1967.
17. OLSON, H. F. *Elements of Acoustical Engineering*. 2. ed. Nova Iorque: Van Nostrand, 1947. 539 p.
18. JONES, F. Dynamic testing of audio amplifiers. *Hi-fi News*, p. 1655–1657, nov. 1970.
19. COLLINS, A. R. Testing amplifiers with a bridge. *Audio*, p. 63-67, mar. 1972.
20. Reviews of seventeen power amplifiers. *Hi-fi for Pleasure*, p. 56-63, mar. 1976.
21. Reviews of eleven preamplifiers. *Hi-fi for Pleasure*, p. 86-107, jun. 1977.
22. HIRAGA, J. Can we hear connecting wires? *Hi-fi News*, p. 35-41, ago. 1977.

23. BAXANDALL, P. J. High fidelity amplifiers. In: AMOS, S. W. (Ed.). *Radio, TV and Audio Technical Reference Book*. Londres: Newnes-Butterworths, 1977. cap. 14.
24. BRAUNMÜHL, H. J.; WEBER, J. The disturbing effect of non-linear distortion. *Akustische Zeit*, vol. 2, p. 35-147, 1937.
25. SHORTER, D. E. L. The influence of high order distortion products. *Electronic Engineering*, p. 67-71, abr. 1950.
26. WIGAN, E. R. New distortion criterion. *Electronic Technology*, p. 48-51, abr. 1961.
27. FRYER, P. A. *Inter-Modulation Distortion Listening Tests*. Londres: Sociedade de Engenharia de Áudio, 1979.
28. MOIR, J. Electrical noise measurement in audio engineering. *Wireless World*, p. 45-48, ago. 1978.
29. BAUER, B. B. Audibility of phase distortion. *Wireless World*, p. 27-28, dez. 1974.
30. BOER, E. Observations on inharmonic signals, *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 29, p. 780, 1975.
31. CRAIG, J. H.; JEFFRESS, L. A. Effect of phase on a two component tone. *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 34, p. 1752, 1962.
32. GOLDSTEIN, J. L. Auditory spectral filtering and monaural phase perception. *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 41, p. 458, 1967.
33. MOULANA, K. *Tonal Colourations Caused by a Single Resonance*. Tese PhD – University of Surrey, Grã-Bretanha, ago. 1975.
34. HARWOOD, H. D. New BBC monitoring loudspeaker. *Wireless World*, p. 74-78, mar. 1968.
35. HARWOOD, H. D. Stereophonic image sharpness. *Wireless World*, p. 207-211, jul. 1968.
36. MOLINA, J. Tecnoforte prata pura. *Guitar Player Brasil*, p. 104, out. 2009.