

Objective and Subjective Assessment of Rub & Buzz and other Irregular Loudspeaker Distortion

Avaliação objetiva e subjetiva de *Rub & Buzz* e outras distorções irregulares de alto-falante

Wolfgang Klippel, Robert Werner,
Klippel GmbH, Dresden, Germany

Abstract

Loudspeaker defects caused by manufacturing, aging, overload or climate impact generate special kind of irregular distortion commonly known as *rub & buzz* which are highly audible and intolerable for the human ear. Contrary to regular loudspeaker distortions defined in the design process the irregular distortions are hardly predictable and are generated by an independent process triggered by the input signal. Traditional distortion measurements such as THD fail in the reliable detection of those defects. The paper discusses the most important defect classes, new measurement techniques, audibility and the impact on perceived sound quality.

Resumo

Defeitos no alto-falante causados na sua fabricação, com o envelhecimento, através da sobrecarga ou do impacto climático, geram um tipo especial de distorção irregular conhecido como *rub & buzz*, a qual é altamente audível e intolerável para o ouvido humano. Ao contrário das distorções regulares do alto-falante, definida no processo de projeto, as distorções irregulares são dificilmente previsíveis e são geradas por um processo independente acionado pelo sinal de entrada. Medições tradicionais, como a distorção THD, falham na detecção confiável desses defeitos. O seguinte artigo discorre sobre as classes de defeitos mais importante, novas técnicas de medição, audibilidade e o impacto na qualidade do som percebido.

1. Introduction Introdução

A major part of the linear and nonlinear signal distortions generated by loudspeaker systems is already determined during the design process as discussed in the first part [1] of two related papers. Those regular distortions are very systematic, reproducible and can be modeled by a linear and a nonlinear subsystem as shown in Figure 1.

A maior parte das distorções lineares e não-lineares do sinal gerado pelo sistema de alto-falante já são determinadas durante o processo de projeto, como discutido na primeira parte

[1] de dois artigos relacionados. Essas distorções regulares são muito sistemáticas, reproduzíveis e podem ser modeladas por um subsistema linear e não-linear, como mostrado na Figura 1

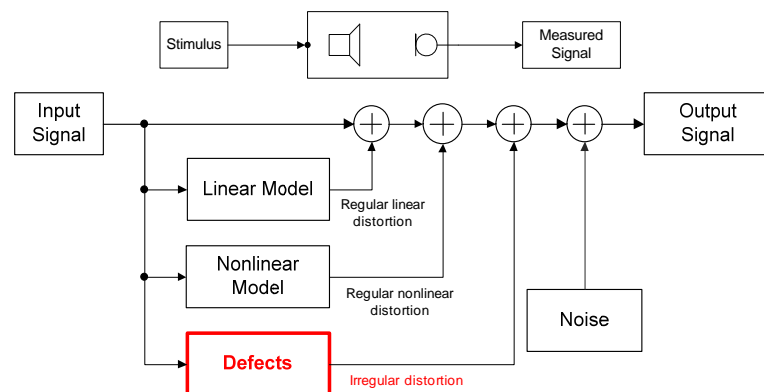


Figure 1: Signal flow diagram showing the generation of signal distortion in a loudspeaker system (model)

Figura 2: Diagrama de fluxo de sinal mostrando a geração de distorção do sinal em um sistema de alto-falante (modelo)

This paper here addresses the third mechanism which is related to loudspeaker defects. Manufacturing errors, aging and overload cause parameter drifts or mechanical defects which are not found in approved prototypes or golden reference units.

Este artigo aborda o terceiro mecanismo, relacionado aos defeitos do alto-falante. Erros de fabricação, envelhecimento e sobrecarga causam parâmetros de desvio ou defeitos mecânicos que não são encontrados nos protótipos aprovados ou nas unidades de referência.

Some of the defects like a short circuit of the voice coil or a deviation in the moving mass may be detected by checking variation of the linear and nonlinear parameters using permissible limits values. Other defects commonly called “*rub and buzz*” generate a different kind of signal distortion which have a much higher impact on the perceived sound quality but can not be detected by conventional measurement techniques. Those distortions are caused by independent sound generation processes being mechanically or acoustically coupled to moving parts of the loudspeaker and triggered by the input signal. In many cases those processes are difficult to model. The properties of stimulus signal (level, spectrum) and other measurement condition (orientation of the driver) have a strong influence on the excitation of those defects. Defects are usually not related to size, weight and cost of the product and vary with time. Therefore, defects which are not audible during end-of-line testing may be detected in the final application (mounted in the car).

Alguns dos defeitos, como um curto-circuito da bobina móvel ou um desvio da massa em movimento podem ser detectados verificando a variação dos parâmetros lineares e não lineares através de valores limites admissíveis. Outros defeitos comumente chamados de “*rub and buzz*” geram um tipo diferente de distorção do sinal, com muito mais impacto na percepção da qualidade sonora, mas não podem ser detectados através de técnicas de medição convencionais. Essas distorções são causadas por processos independentes de geração sonora, sendo acopladas mecânicamente ou acusticamente às partes móveis do alto-falante e acionadas pelo sinal de entrada. Em muitos casos, esses processos são difíceis de

modelar. As propriedades do sinal estimulante (espectro, nível) e outras condições de medição (orientação do *driver*), tem uma forte influência sobre a excitação desses defeitos, os quais não estão normalmente relacionados a tamanho, peso, custo do produto e variação do tempo. Assim, quando os defeitos não são audíveis durante o teste fim-de-linha, podem ser detectados na aplicação final (montado no carro).

The human ear is very sensitive to those irregular distortions especially in a quiet environment. Therefore, trained human operators have been used for subjective evaluation of each unit during end-of-line testing. Shorter cycle times and the new requirements of 100% automatic testing require new measurement techniques to detect those defects reliably.

O ouvido humano é muito sensível a essas distorções irregulares, especialmente em um ambiente silencioso, por isso são utilizadas pessoas treinadas para a avaliação subjetiva de cada unidade durante o teste fim-de-linha. Ciclos mais curtos e novas exigências de um teste 100% automático requerem novas técnicas de medições para detectar-se os defeitos de forma confiável.

Irregular Loudspeaker Defects Defeitos irregulares do alto-falante	Measurements Medições	Characteristics Características
Air leaks in the dust cap or enclosure Vazamentos de ar na capa de proteção ou no gabinete	Sound pressure measurement using single tone stimulus Medição da pressão sonora usando um estímulo de único tom	Modulated Distortion MOD _{rel} , MOD _{abs} Distorção modulada MOD _{rel} , MOD _{abs}
Voice coil rubbing Bobina móvel raspando	Sound pressure measurement using single tone or continuous sweep excitation Medição da pressão sonora usando um único tom ou excitação de varredura continua	Modulated Distortion, Impulsive Distortion Distorção modulada, Distorção impulsiva
Buzzing parts (loose glue joint) Partes zumbindo (junção de cola frouxa)		Deterministic impulsive distortion Distorção impulsiva determinista
Parasitic vibration of the baffle or electronic components Vibração parasita do <i>baffle</i> ou dos componentes eletrônicos		
Bottoming of the voice coil former at the back plate Assentamento da bobina móvel na placa traseira		
Beating of the braid wire Batimento do fio trançado		Random impulsive distortion Distorção impulsiva aleatória
Loose electrical connection due soldering Conexão elétrica frouxa devido à solda		

Loose particles Pequenas partes frouxas		
--	--	--

Table 1: Characteristics and measurement of irregular loudspeaker defects (overview)

Tabela 1: Características e medições de defeitos irregulares do alto-falante (visão geral)

2. Distortion Generation Process Processo de geração de distorção

Table 1 gives a short overview about typical loudspeaker defects and optimal measurement techniques. Most loudspeaker defects behave as an independent oscillator creating a new mode of vibration which is powered, triggered or synchronized by the stimulus [3]. For example a faulty glue joint between the surround and the membrane is such a nonlinear mass-spring system generating weakly damped vibration (*buzzing*) above a critical amplitude of the stimulus. The beating of the braid wire on the loudspeaker diaphragm is a similar defect generating impulses at a particular position of the voice coil. The energy of the irregular distortion is usually very small and does not grow significantly if the level of the stimulus is further increased. Air leaks in dust caps or in sealed enclosures emit a small air flow driven by the ac sound pressure inside the box which generates air turbulences and random noise [4]. Dust and other loose particles within the loudspeaker system are even less predictable and may be accelerated by the cone displacement and hit the diaphragm at unpredictable times.

A Tabela 1 apresenta uma visão geral dos defeitos típicos do alto-falante e das técnicas de medição ideais. A maioria dos defeitos dos alto-falantes comportam-se como um oscilador independente, criando um novo modo de vibração que é alimentado, desencadeado ou sincronizado pelo estímulo [3]. Por exemplo, uma junção falha da borda com a membrana é como um sistema massa-mola não-linear, gerando vibrações fracamente amortecidas (*buzzing*) acima da amplitude crítica do estímulo. A batida do fio trançado no diafragma do alto-falante é um defeito semelhante, gerando impulsos em uma posição particular da bobina móvel. A energia da distorção irregular é geralmente muito pequena e não cresce significativamente com o nível do estímulo. Vazamentos de ar através da capa de proteção ou dos gabinetes emitem um pequeno fluxo de ar impulsionado pela pressão sonora AC dentro da caixa, que gera turbulências do ar e ruído aleatório [4]. Poeira e outras pequenas partes frouxas dentro do sistema de alto-falante são ainda menos previsíveis e podem ser aceleradas pelo deslocamento do cone e, eventualmente, batidas no diafragma.

Parameter variation Variação do parâmetro	Cause Causa	Consequences Consequências
Stiffness $Kms(x=0)$ at rest position, stiffness asymmetry Rigidez $Kms(x=0)$ na posição de repouso, assimetria de rigidez	Ageing, climate conditions (temperature, humidity), gravity, UV light Envelhecimento, condições climáticas (temperatura, umidade), gravidade, luz UV	Shift of resonance frequency, bandwidth, motor instability Mudança da frequência de ressonância, largura de banda, instabilidade do motor
Rest position of voice coil, voice coil offset Posição de repouso da bobina móvel, bobina móvel deslocada		IMD distortion, irregular distortion, motor instability Distorção IMD, distorção irregular, instabilidade do motor

DC resistance $Re(T)$ of voice coil, iron path, magnet Resistência DC $Re(T)$ da bobina móvel, caminho de ferro , ímã	Electrical input power, coil temperature, ambient temperature Potência de entrada elétrica, temperatura da bobina, temperatura ambiente	Thermal power compression Compressão da energia térmica
---	--	--

Table 2: Parameter variations which are indirect causes of irregular distortion (overview)

Tabela 2: Variações dos parâmetros que são causas indiretas da distorção irregular (visão geral)

2.1. Indirect Causes Causas indiretas

The major reasons for defects are problems in the manufacturing process such as poor quality of supplied parts, process drifts and insufficient process control as summarized in table 2. Hard limiting of the voice coil former at the back plate, for example, may be initiated by a larger peak displacement caused by a faulty spider having a stiffness value below specification. Voice coil rubbing [2] may be initiated by a rocking mode corresponding with an asymmetrical mass distribution caused by a faulty glue dispenser, originally.

As principais razões para os defeitos no processo de fabricação, são problemas como a má qualidade das peças fornecidas, desvios de processo e controle insuficiente de processo, conforme resumido na Tabela 2. Uma forte limitação do anel da bobina móvel na parte traseira, por exemplo, pode ser iniciada por um maior deslocamento de pico causado por uma aranha com defeito com uma rigidez abaixo da especificação. A bobina móvel raspando [2] pode ser iniciada por um modo de balanço correspondente com uma distribuição assimétrica causada por um *dispenser* de cola com defeito.

Defects are also caused by systematic errors in loudspeaker design which impair the robustness of the product and make a malfunction at a later time more likely. Typical examples are insufficient clearance of the voice coil in the magnetic gap, wrong position of the braid wire or loudspeaker nonlinearities. Asymmetries in the nonlinear curve shape of force factor $Bl(x)$ and stiffness $Kms(x)$ generate a dynamic DC offsets of the voice coil causing hard limiting of the surround or bottoming of voice coil former at high excursions.

Os defeitos também são causados por erros sistemáticos no projeto do alto-falante, os quais prejudicam a robustez do produto e podem gerar um mau funcionamento com o tempo. Exemplos típicos são a folga insuficiente da bobina no *gap*, posição errada do fio trançado ou não-linearidades do alto-falante. Assimetrias na forma de curva não-linear do fator força $Bl(x)$ e da rigidez $Kms(x)$ geram um deslocamento DC dinâmico da bobina, causando alta limitação da borda ou assentamento da bobina móvel em alta excursões.

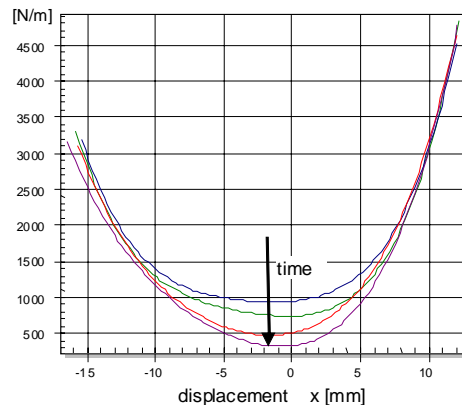


Figure 3: Effect of ageing on stiffness curve of suspension

Figura 2: Efeito do envelhecimento sobre a curva de rigidez da suspensão

Ageing of the loudspeaker is a further reason for malfunction occurring at a later time. Some defects occur in the final application after using the loudspeaker for years corresponding to the aging of the loudspeaker system. Above all the suspension parts (spider, surround) are subject of aging and the stiffness at the rest position decreases systematically with time as shown in Figure 3. Eventually rocking modes, dc displacement and motor instabilities cause consecutive faults like voice coil rubbing and hard bottoming. Excessive use and overload increases fatigue in the material and accelerates this process. Furthermore, the suspension properties depend on temperature and humidity. A critical status of the loudspeaker can be detected by monitoring the linear and nonlinear loudspeaker parameters.

O envelhecimento do alto-falante é outra motivo para seu mau funcionamento. Alguns defeitos ocorrem na aplicação final, depois de alguns anos de uso do alto-falante, o que corresponde ao envelhecimento do sistema do alto-falante. Todas as peças acima da suspensão (aranha, borda) estão sujeitas ao envelhecimento e, assim, a rigidez na posição de repouso diminui sistematicamente com o tempo (Figura 2). Eventualmente modos de balanço, deslocamento DC e instabilidades do motor causam falhas consecutivas, como bobina móvel raspando e forte assentamento. O uso excessivo e a sobrecarga aumentam a fadiga do material e aceleram este processo, além disso, as propriedades da suspensão dependem da temperatura e da umidade. A situação crítica do alto-falante pode ser detectada através do monitoramento dos parâmetros de alto-falantes lineares e não-lineares.

3. Classification of Irregular Defects Classificação de defeitos irregulares

To detect loudspeaker defects already in the initial phase it is important to monitor state variables of the loudspeaker which provide unique symptoms of the defect and make the measurement technique as sensitive as possible. Most defects are originated in the mechanical domain but cause acoustical emissions which have to be detected by a microphone. Besides a loose connection there is no other loudspeaker defect producing significant symptoms in the electrical domain. However, monitoring of voltage and current at the loudspeaker terminals indicate a voice coil offset, aging of the suspension and other initial causes.

Para detectar defeitos no alto-falante já na fase inicial, é importante monitorar suas variáveis de estado, as quais fornecem sintomas únicos do defeito além de usar uma técnica de medição mais sensível possível. A maioria dos defeitos são originados no domínio

mecânico, mas causam emissões acústicas que precisam ser detectadas por um microfone. Com exceção de uma conexão frouxa, não há outro defeito no alto-falante que produza sintomas significativos no domínio elétrico. No entanto, a monitorização da tensão e da corrente nos terminais do alto-falante indicam uma bobina móvel deslocada, envelhecimento da suspensão e outras causas iniciais.

The wide variety of loudspeaker defects may be classified in three groups as shown in Figure 4.

A grande variedade de defeitos em alto-falantes podem ser classificados em três grupos, conforme mostrado na Figura 3.

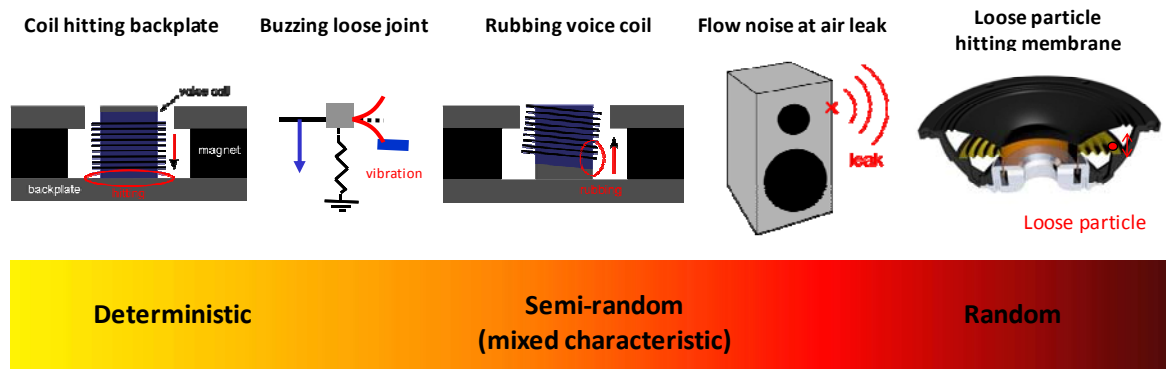


Figure 4: Systematic overview of different loudspeaker defects

Figura 3: Visão sistemática dos diferentes defeitos de alto-falantes

3.1. Deterministic Defects Defeitos deterministas

Defect mechanisms that are strictly coupled to the stimulus are generally very reproducible and result in deterministic patterns of the waveform. A good example is voice coil bottoming or periodic beating of connection wires. Figure 4 shows the isolated distortion for exciting the loudspeaker with a single tone at low frequencies. The signal is very impulsive and strictly periodic corresponding to the period length of the stimulus signal.

Mecanismos defeituosos, estritamente associados ao estímulo, são geralmente muito reprodutíveis e resultam em padrões deterministas da forma de onda. Um bom exemplo é o assentamento da bobina ou a batida periódica dos fios de conexão. A Figura 4 mostra a distorção isolada para o alto-falante excitado com um único tom em baixas frequências. O sinal é muito impulsivo e estritamente periódico, correspondente à duração do período do sinal estimulante.

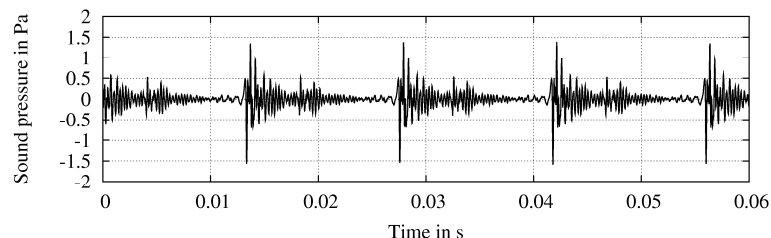


Figure 5: Sound pressure signal of isolated distortion caused by a hard limiting voice coil at single tone excitation

Figura 4: Sinal de pressão sonora de distorção isolada, causado por uma bobina móvel fortemente limitada com excitação de único tom

The corresponding amplitude spectrum in Figure 6 shows a good and a defective unit. The harmonic structure in the defective spectrum affirms the strict periodicity in the time domain. In contrast to regular loudspeaker distortion the higher-order harmonics (>10) have a much higher amplitude in the defective unit. Those harmonic components are also almost in-phase (not shown in Fig. 5) causing the characteristic impulses in Fig. 4.

O espectro em amplitude correspondente na Figura 5 mostra uma unidade boa e uma defeituosa. A estrutura harmônica no espectro defeituoso afirma a periodicidade rigorosa no domínio do tempo. Ao contrário da distorção de alto-falantes regulares, os harmônicos de ordem superior (> 10) tem uma amplitude muito maior na unidade defeituosa e estão quase em fase (não mostrado na Fig 5.), causando os impulsos característicos na Fig. 4.

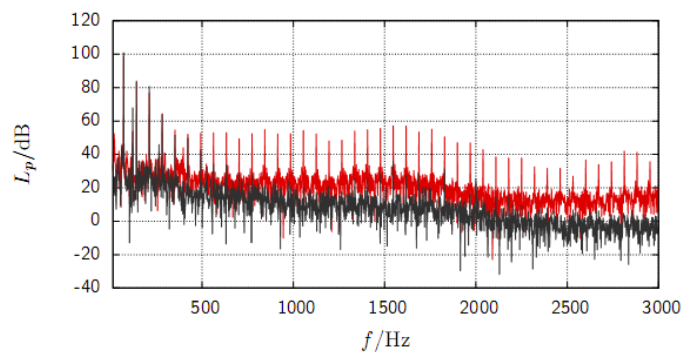


Figure 6: Single tone sound pressure response spectrum of a good (red curve) and a defective (black curve) driver revealing high order harmonic distortion caused by a hard limiting voice coil

Figura 5: Espectro da resposta da pressão sonora de único tom de um *driver* bom (curva vermelha) e um com defeito (curva preta), revelando distorção de alta ordem harmônica causada por uma bobina móvel fortemente limitada

3.2. Semi-random Defects (mixed characteristic) Defeitos semi-aleatório (característica mista)

Other defects such as voice coil rubbing and air leaks produce waveform which is not deterministic and changes for a periodical stimulus.

Outros defeitos como a bobina móvel raspando e vazamentos de ar produzem uma forma de onda que não é determinista e muda com um estímulo periódico.

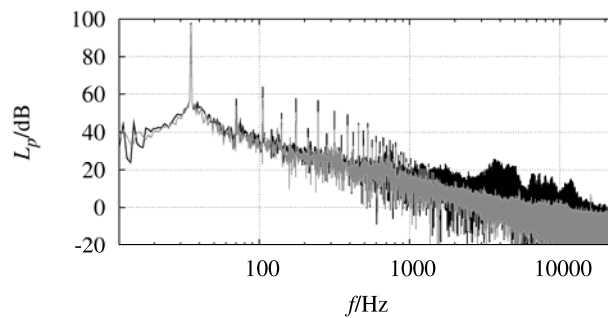


Figure 7: Single tone sound pressure response spectrum of a good (gray) and a defective unit (black) with a leaky enclosure

Figura 8: Espectro de resposta da pressão sonora de único tom de um gabinete bom (cinza) e um com defeito de vazamento (preto)

Figure 7 shows the (black) spectrum of a closed-box loudspeaker system having a small air leak compared with the (gray) spectrum after sealing the enclosure carefully. A low frequency tone at 35 Hz was used as stimulus to generate sound pressure fluctuation in the enclosure and excite the leak noise monitored by a microphone. The fundamental component and harmonic distortion components are clearly visible as spikes in both spectra. The air noise appears as a broad band and dense spectrum at frequencies above 1 kHz almost 80 dB below the fundamental. Transferring the high-pass filtered signal back to time domain reveals a random noise like signal which has a characteristic envelope corresponding to the stimulus length as shown in Figure 9.

A Figura 6 mostra o espectro (preto) de um sistema de alto-falante com caixa fechada, com um vazamento de ar pequeno comparado com o espectro (cinza) após a selagem da caixa cuidadosamente. Um tom de baixa frequência em 35 Hz foi usado como estímulo para gerar flutuação da pressão sonora no gabinete e excitar o barulho do vazamento monitorado por um microfone. A componente fundamental e as componentes de distorção harmônica são claramente visíveis como picos em ambos espectros. O ruído do ar aparece com uma faixa de espectro amplo e denso em frequências acima de 1 kHz, quase 80 dB abaixo da fundamental. Transferindo-se o sinal de passa-altas filtrado de volta ao domínio do tempo, surge um ruído aleatório como sinal, com um envelope característico correspondente ao comprimento do estímulo, como mostrado na Figura 7.

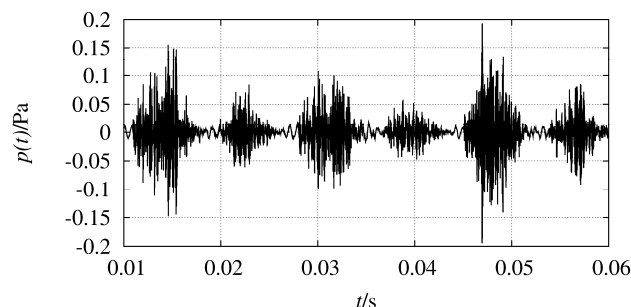


Figure 9: Sound pressure signal of isolated air noise caused by a leaky subwoofer enclosure at single tone excitation

Figura 7: Sinal da pressão sonora de um ruído do ar isolado, causado por uma caixa de *subwoofer* com vazamento na excitação de único tom

3.3. Random Defects Defeitos aleatórios

The last independent group of defects causes symptoms which are completely random, and not synchronized with the stimulus as shown in Fig. 8. The stimulus provides only the energy to accelerate the loose particle or to change the electrical resistance of a loose electrical contact or soldering problem in a non-predictable way.

O último grupo independente de defeitos provoca sintomas que são completamente aleatórios, e não sincronizados com o estímulo, como mostrado na Fig. 8. O estímulo fornece apenas a energia para acelerar a parte frouxa ou para alterar a resistência elétrica de um contato elétrico frouxo ou de um problema de solda de uma forma não-previsível.

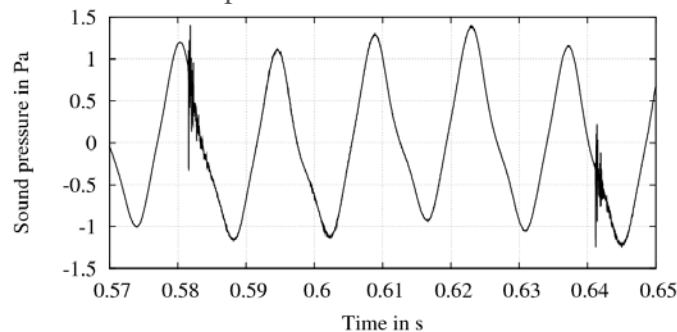


Figure 10: *Sound pressure signal of a driver containing a loose particle at single tone excitation*

Figura 8: Sinal da pressão sonora de um *driver* contendo uma pequena parte frouxa na excitação de único tom

4. Measurement Medição

4.1. Choosing the right Stimulus Escolhendo o estímulo certo

The properties of the stimulus affect the sensitivity of the measurement in two ways:

First, the defects require sufficient energy to provide significant symptoms. A single tone stimulus, a stepped sine wave, pink noise or music and speech can not ensure sufficient excitation of narrow band resonators with a high Q-factor. A continuous sinusoidal chirp signal with an optimal sweep speed profile is the most critical stimulus because it excites all frequencies in the shortest measurement time while providing high resolution at low frequencies where most defects occur. Air leaks may be detected by using a single tone as stimulus having a fixed frequency close to the fundamental driver resonance or port resonance of a vented-box system producing sufficient pressure fluctuation inside the box.

As propriedades do estímulo afetam a sensibilidade da medição de duas maneiras: Primeiro, os defeitos precisam de energia suficiente para fornecer sintomas significativos. Um estímulo de único tom, uma onda senoidal em degraus, um ruído rosa ou música e fala não garantem uma excitação suficiente dos ressonadores de banda estreita com um alto fator-Q. Um sinal senoidal *chirp* contínuo, com um perfil ideal de velocidade de varredura é o melhor estímulo, pois estimula todas as frequências no menor tempo de medição, proporcionando alta resolução em baixas frequências, onde ocorrem a maioria dos defeitos. Os vazamentos de ar podem ser detectados através de um estímulo de único tom, com uma

frequência fixa perto da ressonância fundamental do *driver* ou do duto de um sistema de caixa ventilada, produzindo dentro da caixa flutuação suficiente da pressão.

Second, the symptoms of the defects are broad band phenomena having a spectral power density which is much smaller than the fundamental component and other regular distortion. Therefore, it is a further objective of signal analysis to separate irregular distortion from the other signal components. This can be accomplished easily by using a high-pass or tracking filter if the stimulus has a limited bandwidth or a sparse spectrum as a single-tone, sinusoidal sweep or multi-tone complex. This approach fails in more complex stimuli having a dense spectrum like (pseudo)-random noise, music or speech. The incoherence between input and output spectrum may be calculated for those stimuli but is unfortunately not sensitive for irregular distortion because the power spectra are dominated by the (regular) nonlinear distortion and measurement noise.

Em segundo lugar, os sintomas dos defeitos são fenômenos de banda larga tendo uma densidade espectral de potência muito menor do que a componente fundamental e outras distorções regulares. Portanto, outro objetivo da análise de sinais é separar a distorção irregular das componentes de outros sinais. Isso pode ser feito facilmente usando um filtro passa-altas ou de rastreamento se o estímulo tiver uma largura de banda limitada, um espectro escasso com um único tom, uma varredura senoidal ou um multi-tom complexo. Essa abordagem falha em estímulos mais complexos, com um espectro denso como ruídos (pseudo)-aleatórios, música ou fala. A diferença entre o espectro de entrada e de saída pode ser calculada para esses estímulos, mas infelizmente não é sensível a distorção irregular, pois os espectros de potência são dominados pela distorção (regular) não-linear e pela medição de ruído.

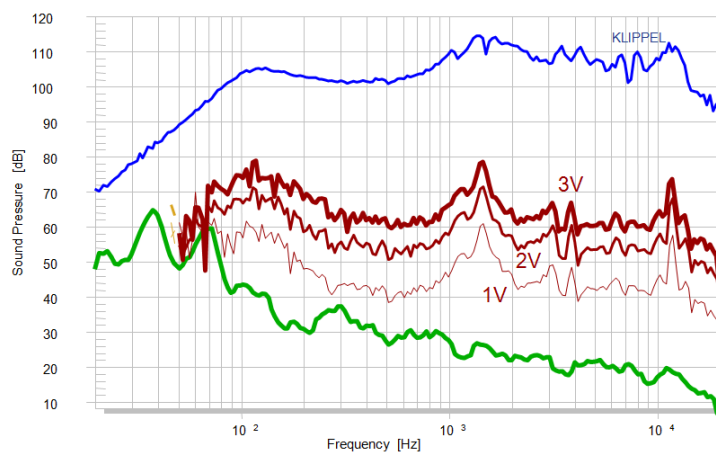


Figure 11: Multi-tone distortion (red curves) measured at three different excitation voltages (1V, 2V, and 3V), fundamental response (upper curve) and noise floor measured without excitation (lower curve). The multi-tone distortion reveals no symptoms of voice coil rubbing occurring at 3V only.

Figura 9: Distorção multi-tom (curvas vermelha) medida em três tensões de excitação diferentes (1V, 2V e 3V), a resposta fundamental (curva superior) e o ruído de fundo medido sem excitação (curva inferior). A distorção multi-tom não revela sintomas da bobina móvel raspando, ocorrendo apenas em 3V.

For the same reason a multi-tone stimulus is also not very useful for measuring irregular distortion. Figure 11, for example reveals no symptoms of a clearly audible defect occurring at 3V because the regular distortion generated by the accepted loudspeaker nonlinearities have 10 to 100 times more power and mask the coil rubbing completely.

Pela mesma razão, um estímulo multi-tom também não é muito usual na medição da distorção irregular. A Figura 9, por exemplo, não revela sintomas de um defeito claramente audível em 3V, pois a distorção regular gerada pelas não-linearidades aceitas do alto-falante tem de 10 a 100 vezes mais potência, mascarando completamente a bobina raspando.

4.2. Frequency Domain Analysis *Análise da frequência no domínio*

Using a single tone or continuous sweep as stimulus the irregular distortion can be easily separated from the other signal components in the frequency domain.

Usando um único tom ou uma varredura contínua como estímulo, a distorção irregular pode ser facilmente separada das componentes de outros sinais no domínio da frequência.

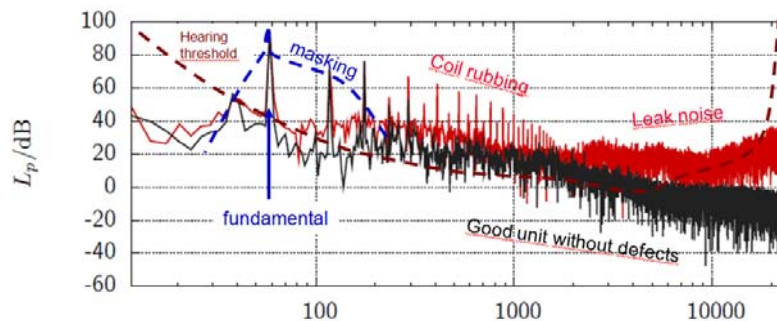


Figure 12: Long term sound pressure spectra of a defective and a reference loudspeaker of the same type; measured with single tone excitation (60 Hz)

Figura 10: Espectros da pressão sonora a longo prazo de um alto-falante defeituoso e de um de referência do mesmo tipo; medidos com excitação de único tom (60 Hz)

Figure 12 shows the spectra of an intact loudspeaker and a faulty speaker with a rubbing coil and a small air leak at the dust cap. The fundamental component and the low-order harmonics ($n < 10$) reflect the regular distortion. The rubbing coil causes a significant difference in the higher-order harmonics ($10 < n < 50$) and the air leakage noise appears as a dense spectrum above 1 kHz more than 70 dB below the fundamental. Randomly occurring defects like loose particles have even less energy which is spread over the whole spectrum and can hardly be distinguished from the noise floor. Applying reasonable PASS/FAIL limits is difficult especially in the presents of production noise.

A Figura 10 mostra os espectros de um alto-falante bom e de um defeituoso com uma bobina raspando e um pequeno vazamento de ar na capa de proteção. A componente fundamental e os harmônicos de baixa ordem ($n < 10$) refletem a distorção regular. A bobina raspando provoca uma diferença significativa nos harmônicos de ordem superior ($10 < n < 50$) e o ruído do vazamento de ar aparece como um espectro denso acima de 1 kHz, mais de 70 dB abaixo da fundamental. Defeitos que ocorrem de forma aleatória, como pequenas partes frouxas, possuem energia espalhada por todo o espectro e dificilmente podem ser distinguidos do ruído de fundo. É difícil aplicar limites PASS/FAIL razoáveis, especialmente nesta produção de ruído.

4.3. Time Domain Analysis *Análise no domínio do tempo*

The frequency domain analysis provides not only the amplitude information of the irregular distortion but also phase information which determines the waveform of the irregular distortion in the time domain. As shown in Fig. 7 and 8 most of the irregular distortions have an impulsive fine structure resulting in a higher crest factor than the regular distortion. This crest factor corresponds with the phase relation of the higher-order harmonics and has high diagnostic value as discussed below. Since the interpretation of a complex spectrum is difficult it is more useful to continue the analysis in time domain or to separate directly the irregular distortion in the original microphone signal using a high-pass or tracking filter which is synchronized with the instantaneous excitation frequency of the sinusoidal sweep as shown in Figure 13.

A análise no domínio da frequência não só fornece informações sobre a amplitude da distorção irregular, mas também informação de fase que determina a forma de onda da distorção irregular no domínio do tempo. Como mostrado nas Fig. 7 e 8, a maioria das distorções irregulares tem uma estrutura bem impulsiva, resultando em um fator de crista maior do que da distorção regular. Este fator de crista corresponde à relação de fase dos harmônicos de ordem superior e tem alto valor diagnóstico, como discutido abaixo. Quando a interpretação de um espectro complexo é difícil, é melhor continuar a análise no domínio do tempo ou separar diretamente a distorção irregular no sinal do microfone original, usando um filtro passa-alta ou de rastreamento sincronizado com a frequência instantânea de excitação da varredura senoidal, de acordo com a Figura 11.

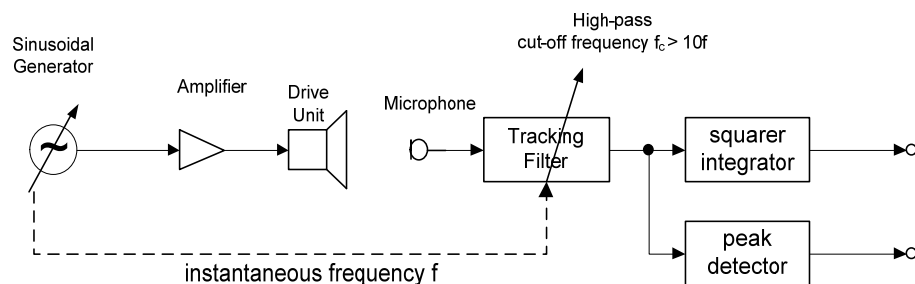


Figure 13: Separation of irregular distortion in the time domain using a high-pass filter synchronized with the frequency of the sinusoidal stimulus

Figura 11: Separação de distorção irregular no domínio do tempo usando um filtro passa-alta sincronizado com a frequência do estímulo senoidal

The most important characteristic of the irregular distortion is the instantaneous peak value and the rms value calculated within one period of the sinusoidal stimulus and may be plotted versus instantaneous excitation frequency as shown in Figure 14.

A característica mais importante da distorção irregular é o valor de pico instantâneo e o valor rms calculado dentro de um período do estímulo senoidal e pode ser plotada em função da frequência de excitação instantânea, como mostrado na Figura 12.

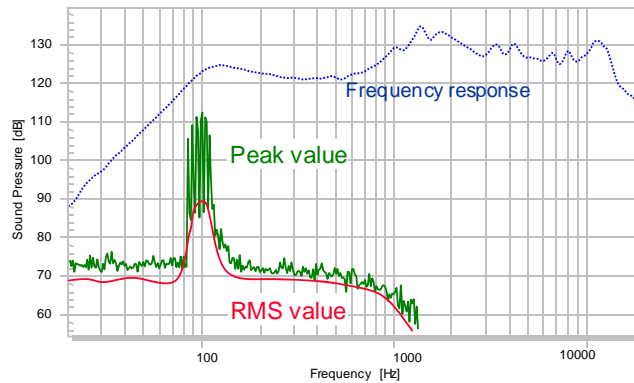


Figure 14: Peak and rms-value of the irregular distortion measured versus frequency by using a continuous sine sweep

Figura 12: O valor de pico e o valor rms da distorção irregular medida versus a frequência usando uma varredura senoidal contínua

While the rms-value corresponds with the power of the irregular distortion the peak value is more sensitive for impulsive symptoms in the fine structure of the waveform. For example the defect in Fig. 12 generates at 100 Hz a peak value which is more than 20 dB higher than the rms-value.

Enquanto o valor rms corresponde à potência da distorção irregular, o valor de pico é mais sensível para os sintomas impulsivos na estrutura fina da forma de onda. Por exemplo, o defeito na Fig. 12 gera em 100 Hz um valor de pico que é mais de 20 dB acima do valor rms.

The crest factor which is the ratio between peak and rms value is also a very interesting characteristic for irregular distortion exploiting the phase information which could not be interpreted in the frequency domain analysis. For regular harmonic distortion and measurement noise the crest factor is about 10 dB but shows much higher values for any irregular distortion which are more impulsive [2].

O fator de crista, relação entre o pico e o valor rms, é também uma característica muito interessante para a distorção irregular, pois explora a informação de fase que não poderia ser interpretada na análise no domínio da frequência. Para a distorção harmônica regular e para a medição de ruído, o fator de crista é de cerca de 10 dB, mas apresenta valores muito mais altos para qualquer distorção irregular mais impulsiva [2].

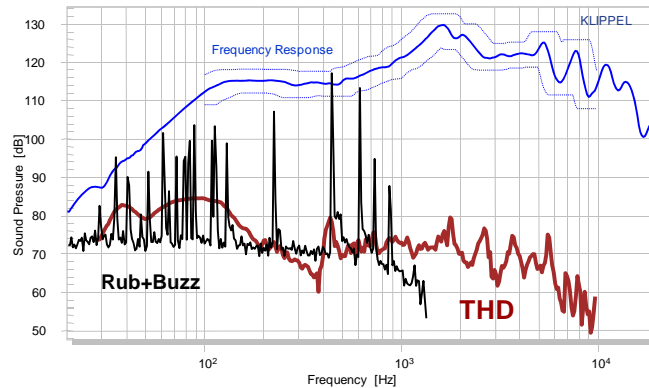


Figure 15: Frequency response, total harmonic distortion (THD) and peak value of the irregular distortion (*Rub+Buzz*) of a faulty driver with a small loose particle

Figura 13: Resposta de frequência, distorção harmônica total (THD) e valor de pico da distorção irregular (*Rub+Buzz*) de um *driver* defeituoso, com uma pequena parte frouxa

Figure 15 compares the peak value of the irregular distortion (*Rub+Buzz*) with *Total Harmonic Distortion* (THD) measured by using conventional techniques. The small loose particle can not be detected in the THD curve but generates distinct peaks of 30 dB in the irregular distortion.

A Figura 13 compara o valor de pico da distorção irregular (*Rub+Buzz*) com a Distorção Harmônica Total (THD) medida por meio de técnicas convencionais. A pequena parte frouxa não pode ser detectada na curva de THD, porém gera picos distintos de 30 dB na distorção irregular.

4.4. Separation of Deterministic and Random Distortion Separação da distorção determinista e aleatória

Exciting the loudspeaker by a periodic stimulus such as a sinusoidal tone it is possible to separate the deterministic from the random components and to derive further characteristics which increase the sensitivity of the measurement.

O alto-falante excitado por um estímulo periódico, como um tom senoidal, pode separar as componentes deterministas das aleatórias e obter outras características que aumentam a sensibilidade da medição.

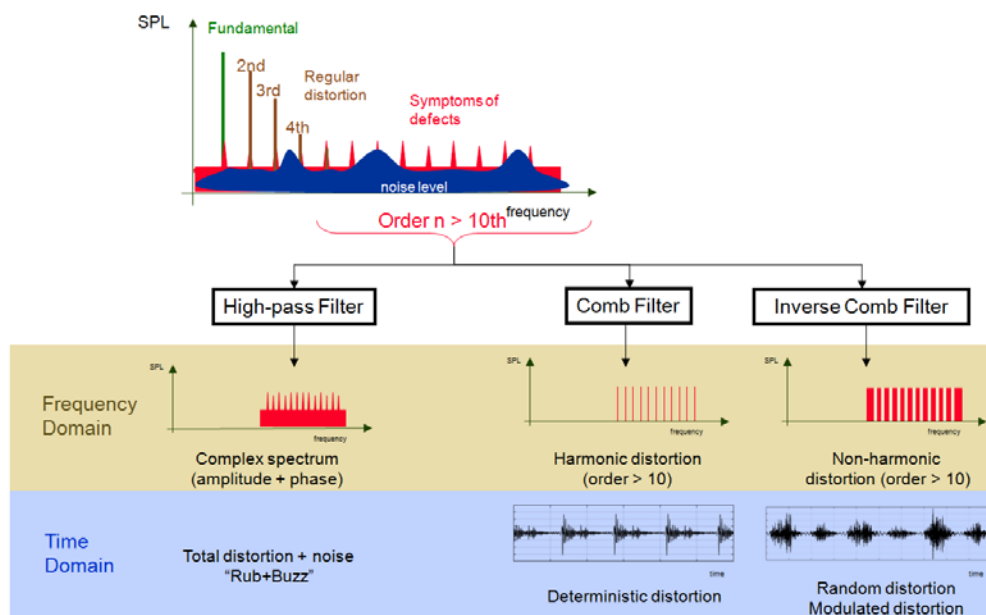


Figure 16: Separation of deterministic and random components of the irregular distortion using a periodic stimulus

Figura 14: Separação de componentes deterministas e aleatórias da distorção irregular através de um estímulo periódico

Using a comb filter that only transfers the higher-order harmonics of the irregular distortion ($n > 10$) gives the deterministic part of the irregular distortion. This is a sensitive characteristic for hard limiting of the surround, bottoming of the voice coil, wire beating and other periodic mechanisms. An inverse comb filter which passes all high-frequency components but blocks all harmonics separates the random distortion caused by loose particles and semi-random distortion caused by air leaks and coil rubbing.

Utilizando um filtro pente, que apenas transfere os harmônicos de ordem superior da distorção irregular ($n > 10$), obtém-se a parte determinista da distorção irregular. Esta é uma característica sensível para a forte limitação da borda, assentamento da bobina móvel, batida de fio e outros mecanismos periódicos. Um filtro pente inverso, no qual todas as componentes de alta frequência passam e todos os harmônicos são bloqueados, separa a distorção aleatória, causada por pequenas partes frouxas da distorção semi-aleatória, causada por vazamentos de ar e raspagem da bobina.

4.5. Averaging of deterministic distortion Média de distorção determinista

Conventional averaging can be applied to the deterministic distortion producing identical pattern in each period of the stimulus. Averaging attenuates other stochastic components like ambient and microphone noise and improves the signal to noise ratio by 3 dB for doubling the averaging time.

A média convencional pode ser aplicada para a distorção determinista, produzindo um padrão idêntico em cada período do estímulo. Ela atenua a média de outras componentes aleatórias, como o ruído ambiente e do microfone e melhora a relação sinal-ruído em 3 dB para a duplicação do tempo médio.

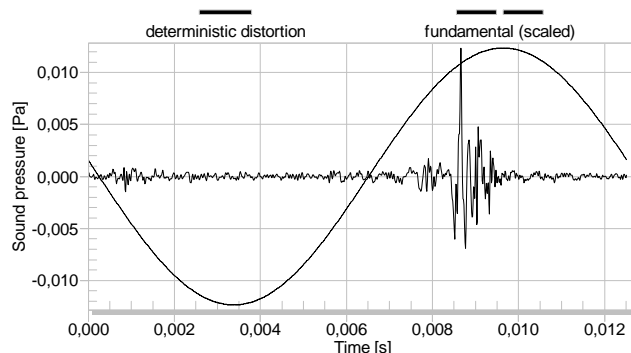


Figure 17: Averaged deterministic distortion as solid line in the time domain compared with period of the stimulus (not scaled)

Figura 15: Distorção determinista média como linha sólida no domínio do tempo comparado com período do estímulo (sem escala)

Figure 17 shows the deterministic distortion averaged over 100 periods generated by a beating wire. The peak and rms-value may also be derived from the averaged signal. The high crest factor of 21.4 dB indicates a high significant impulsiveness which is typical for this defect.

A Figura 15 mostra a distorção determinista média em mais de 100 períodos gerados por uma batida de fio. O valor de pico e o valor rms também podem ser derivados a partir do sinal médio. O alto fator de crista de 21,4 dB indica um alto impulso significativo que é típico deste defeito.

4.6. Modulated distortion Distorção modulada

Air leaks and other semi-random defects produce a stochastic noise-like signal which is modulated in a deterministic way. The envelope directly corresponds with the fundamental frequency supplied via the stimulus to the loudspeaker and low-order harmonics. Conventional averaging of the original time signal would reduce the stochastic symptoms in the same way as ambient noise and other uncorrelated signals are attenuated. Consequently averaging should only be applied to the deterministic information which is the envelope of the noise signal. This can be accomplished by using a new asynchronous demodulation technique [4].

Vazamentos de ar e outros defeitos semi-aleatório produzem um sinal-ruído aleatório, modulado de forma determinista. O envelope corresponde diretamente com a frequência fundamental fornecida pelo estímulo para o alto-falante e pelos harmônicos de baixa ordem. A média convencional do sinal de tempo original reduziria os sintomas aleatórios na mesma proporção que reduziria o ruído ambiente e outros sinais não correlacionados, concluindo-se que a média só deve ser aplicada à informação determinista, a qual é o envelope do sinal de ruído. Isso pode ser feito usando uma nova técnica de demodulação assíncrona [4].

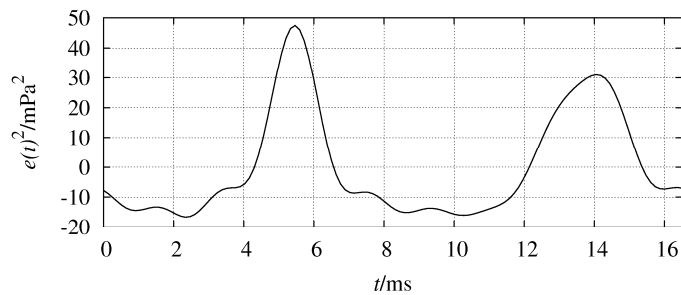


Figure 18: Averaged squared modulation envelope $\overline{e(t)^2}$

Figura 19: Envelope do quadrado da modulação média

Figure 18 shows the averaged modulation envelope of irregular distortion emitted by a box leak. The turbulent noise is emitted twice per period when the sound pressure inside the box has a positive or negative maximum. Reading the maximal peak value of the averaged squared envelope gives the *absolute* and *relative Modulation Level*, MOD_{abs} and MOD_{rel} , respectively. Values of MOD_{rel} close to 0 dB indicate no significant modulation but higher values above 5 dB reveal significant modulations caused by air leaks, voice coil rubbing or other semi-random defects.

A Figura 16 mostra o envelope de modulação média de uma distorção irregular emitida por um vazamento na caixa. O ruído turbulento é emitido duas vezes por período, quando a pressão do som dentro da caixa tem um máximo positivo ou negativo. A partir da leitura do valor máximo de pico do envelope médio ao quadrado, obtém-se o nível de modulação absoluto e relativo, MOD_{abs} e MOD_{rel} , respectivamente. Valores de MOD_{rel} perto de 0 dB indicam que não há modulação significativa, porém valores mais elevados, acima de 5 dB, revelam modulações significativas causadas por vazamentos de ar, bobina de voz raspando ou outros defeitos semi-aleatórios.

5. Perception of Irregular Distortion Percepção de distorção irregular

The last section of this paper continues the discussion of the perceptual assessment of loudspeaker distortion as started in the first paper [1] but focuses here on the audibility of the irregular distortion and the impact on perceived sound quality.

A última seção deste artigo continua a discussão sobre a avaliação perceptual da distorção de alto-falante assim como apresentado no primeiro artigo [1], mas concentra-se aqui na audibilidade da distorção irregular e no impacto na qualidade do som percebido.

5.1. Audibility Audibilidade

5.1.1. Masking by Fundamental components Mascaramento pelas componentes fundamentais

The perception of the irregular distortion highly depends on the spectral complexity of the stimulus. A single tone or sinusoidal sweep is the most critical stimulus not only for an objective measurement system but also for the human ear. For this reason a human operator prefers a simple sine generator for testing loudspeakers at the assembling line. Other test

signals such as two-tone signals, multi-tone complexes and music and speech are less critical and less useful for detecting irregular loudspeaker defects in the shortest time possible and at high reliability. The main reason for this is the spectral masking effect in the perceptual processing of our ear. For a single tone used as stimulus the irregular distortion are far away from the fundamental component and are not masked by the excitation threshold generated by the stimulus. Filling the stimulus with further excitation components each fundamental will also excite all critical bands close to the fundamentals and the resulting excitation level masks irregular distortion.

A percepção da distorção irregular depende altamente da complexidade espectral do estímulo. Uma varredura senoidal ou de tom único é o estímulo mais importante, não só para um sistema de medição objetivo, mas também para o ouvido humano. Por esta razão, um operador humano prefere um gerador senoidal simples para testar alto-falantes na linha de montagem. Outros sinais de teste, tais como sinais de dois tons, multi-tons complexos, música e fala são menos críticos e menos usuais para detectar defeitos irregulares de alto-falantes com rapidez e alta confiabilidade. A principal razão é o efeito de mascaramento espectral no processamento de percepção do nosso ouvido. Para um estímulo de único tom, a distorção irregular está longe da componente fundamental e não é mascarada pelo limiar de excitação gerado pelo estímulo. Preenchendo-se o estímulo com outras componentes de excitação, cada fundamental excitará também todas as bandas críticas perto das fundamentais e o nível de excitação resultante irá mascarar a distorção irregular.

5.1.2. Masking by the hearing threshold Mascaramento pelo limiar auditivo

Irregular distortion has a low power spectral density which is close to the hearing threshold of the human ear. Some loudspeaker defects such as air leaks are inaudible if the loudspeaker is far away from the listening point but can easily be detected at a closer position. For this reason a human tester can more reliably detect defects on small loudspeakers at a relatively small listening distance. An automatic measurement system using sensitive microphones, a test box for shielding ambient noise may outperform a human tester and can detect defects in an early phase.

A distorção irregular tem uma baixa densidade espectral de potência, que é perto do limiar de audição do ouvido humano. Alguns defeitos de alto-falante, como vazamentos de ar são inaudíveis quando o alto-falante está longe do ponto de escuta, porém podem ser facilmente detectados quando mais próximos. Por esta razão, um testador humano pode ser mais confiável para detectar defeitos em alto-falantes pequenos, a uma distância de escuta relativamente pequena. Um sistema de medição automática usando microfones sensíveis e uma caixa de teste para blindagem de ruído ambiente podem superar um testador humano e detectar defeitos em uma fase anterior.

5.1.3. Masking by regular distortion Mascaramento pela distorção regular

The regular nonlinearities as defined by motor and suspension design as discussed in part 1 of this paper also mask the irregular distortion. This mechanism affects subjective testing on the assembling line. A trained operator can reliably detect a defect at medium excitation level but fails if the voltage of stimulus is increased. The reason is that the regular rise with excitation level but the irregular distortion stay at almost the same level. However, some defects are only activated if the voice coil displacement is high. This dilemma can only be solved by a measurement instrument which compensates actively for the regular distortion using an adaptive system learning the deterministic properties of good units (meta-hearing technology).

As não-linearidades regulares definidas pelo projeto do motor e da suspensão, discutido na parte 1 deste artigo, também mascaram a distorção irregular. Este mecanismo afeta testes subjetivos na linha de montagem. Um operador treinado pode detectar confiavelmente um defeito a nível de excitação médio, mas falha se a tensão do estímulo for maior. A razão é que a distorção regular aumenta com nível de excitação, mas a distorção irregular permanecer quase no mesmo nível. No entanto, alguns defeitos somente são ativados quando o deslocamento da bobina é alto. Este dilema só pode ser resolvido por um instrumento de medição que compensa ativamente a distorção regular usando um sistema de aprendizado adaptativo às propriedades deterministas das boas unidades (*meta-hearing technology*).

5.2. Impact on Sound Quality Impacto na qualidade sonora

The term of sensory pleasantness combines different aspects to take into account the aesthetics and annoyance of auditory events. The influencing factors are loudness, tonality, sharpness and roughness. Referring to irregular loudspeaker distortion the last two mentioned factors have to be examined in detail.

O termo agradabilidade sensorial combina diferentes aspectos considerando a estética e o incomodo de eventos auditivos. Os fatores que influenciam são a sonoridade, tonalidade, nitidez e aspereza. Com relação às distorções irregulares em alto-falantes nos últimos dois fatores mencionados, é necessária uma examinação detalhada.

5.2.1. Sharpness Nitidez

Irregular distortions are a broad band signal covering the complete audio band up to ultrasonic frequencies. Those components increase the sharpness of the perceived sound which is modeled by Zwicker [5] using specific loudness model and a weighting function rising to higher frequencies, starting at 3 kHz. This sensation of sharpness may be generated by many frequency component is widely independent of level and the spectral fine structure, especially within one critical bandwidth. For a low frequency stimulus the sharpness of the perceived sound is mostly determined by the irregular distortion generated by the speaker. Especially air leaks increase the sharpness of the perceived sound significantly and can easily be detected in subwoofers only reproducing a bass signal. High values of sharpness are perceived as unpleasant.

As distorções irregulares são um sinal de banda larga que cobrem a faixa completa de áudio até as frequências ultra-sônicas. Essas componentes aumentam a nitidez do som percebido que é modelada por Zwicker [5], usando o modelo de volume específico e uma função de ponderação deslocando-se para frequências mais altas, a partir de 3 kHz. Esta sensação de nitidez pode ser gerada por muitas componentes de frequência, é amplamente independente do nível e da estrutura espectral fina, especialmente dentro de uma largura de banda crítica. Para um estímulo de baixa frequência, a nitidez do som percebida é principalmente determinada pela distorção irregular gerada pelo falante. Principalmente os vazamentos de ar aumentam a nitidez do som percebido de forma significativa e podem ser facilmente detectados em *subwoofers* reproduzindo apenas um sinal baixo. Altos valores de nitidez são desagradáveis.

5.2.2. Roughness Aspereza

The detection of irregular distortion and the impact on perceived sound quality cannot be explained by considering the spectral properties only. The temporal fine structure of the

irregular distortion, especially the periodic variation of the signal envelope is highly relevant for the human perception. This is the case for most stimulus coupled irregular distortions initiated by air leakage and other semi-random defects. The human auditory system perceives amplitude modulation of single tones and broad band noise between 20 and 300 Hz as “*roughness*” which is inversely proportional to auditory pleasantness increasing the aggressiveness and noticeability. Especially in the relevant frequency range defects are most likely to be excited.

A detecção da distorção irregular e o impacto na qualidade do som percebido não podem ser explicados considerando-se apenas as propriedades espectrais. A estrutura temporal fina da distorção irregular, especialmente a variação periódica do envelope do sinal, é altamente relevante para a percepção humana. Este é o caso da maioria dos estímulos das distorções irregulares acopladas iniciadas com um vazamento de ar e outros defeitos semi-aleatórios. O sistema auditivo humano percebe modulação de amplitude de sons simples e de ruído de banda larga entre 20 e 300 Hz como “aspereza”, que é inversamente proporcional à agradávelidade auditiva, aumentando a agressividade e a percepção. Há maior probabilidade de ser percebida em defeitos na faixa de frequências relevantes.

6. Summary and Conclusion Sumário e Conclusão

Loudspeaker defects generate irregular distortions that are often impulsive, highly audible and unpleasant to the human ear due to high perceptual roughness and sharpness. Contrary to regular distortions which are directly related to cost, weight and size of the loudspeaker the irregular distortion are usually caused by parameter variation of the soft parts (spider and surround), insufficient process control, aging and overload. The generation of irregular distortion is difficult to model, depends on particular properties of the stimulus, operation conditions of the driver (orientation) and even become worse over time. It is risky to ship faulty loudspeakers even if the symptoms are almost inaudible. Manufacturers use experienced operators for the subjective testing at the end-of-line which are more sensitive than an untrained ear to detect defects already in the initial state. A measurement instrument which exploits the particular irregular distortion symptoms can detect defects objectively in a shorter time, more reliably and more sensitive than a human ear. It also provides diagnostic clues about the physical cause of the defect and can cope with ambient production noise corrupting the measurement.

Os defeitos nos alto-falantes geram distorções irregulares que muitas vezes são impulsivas, altamente audíveis e desagradáveis ao ouvido humano devido à alta percepção da aspereza e nitidez. Ao contrário das distorções regulares que estão diretamente relacionados ao peso, custo e tamanho do alto-falante, as distorções irregulares são geralmente causadas por variação do parâmetro de partes flexíveis (aranha e borda), controle de processos insuficientes, envelhecimento e sobrecarga. A geração da distorção irregular é difícil de ser modelada, depende de propriedades particulares do estímulo, das condições de operação do *driver* (orientação) e pioram ao longo do tempo. É arriscado aprovar alto-falantes com defeito, mesmo que os sintomas sejam quase inaudíveis. Os fabricantes usam operadores experientes para o teste subjetivo no final-de-linha, que são mais sensíveis do que um ouvido destreinado para detectar defeitos já no estado inicial. Um instrumento de medição que explora os sintomas particulares da distorção irregular pode detectar defeitos objetivamente em um tempo menor, com maior confiabilidade e sensibilidade do que um ouvido humano. Além de fornecer dicas para o diagnóstico da causa física do defeito e conseguir lidar com o ruído ambiente que corrompe a medição.

Irregular distortions which become audible in the final application are generally not acceptable for the user having a significant negative impact on the perceived sound quality. Rental companies for professional equipment are interested in anticipating this point to avoid a malfunction during the concert. Sensitive measurement instruments may indicate the first symptoms and also regular testing of the motor and suspension properties indicate fatigue and the progress of ageing processes.

As distorções irregulares que tornam-se audíveis na aplicação final, geralmente não são suficientes para que o usuário tenha um impacto negativo sobre a qualidade do som percebido. Empresas de aluguel de equipamento profissional estão interessadas em antecipar este ponto para evitar um mau funcionamento durante o show. Instrumentos de medição sensíveis podem indicar os primeiros sintomas e testes regulares das propriedades do motor e da suspensão indicam a fadiga e o progresso do processo de envelhecimento.

7. References

- [1] Klippel, W.; Werner, R.: “Loudspeaker Defects – Measurement and Perception. Part 1: Regular distortion defined by design.” *Tonmeistertagung Leipzig, Nov. 2010*
- [2] Klippel, W.; Seidel, U.: “Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and other Disturbances” *114th AES convention Amsterdam, Mar. 2003*
- [3] Klippel, W.; Irrgang, S.; Seidel, U.: “Loudspeaker Testing at the Production Line” *120th AES convention Paris, May 2006*
- [4] Klippel, W.; Werner, R.: “Measurement of Turbulent Air Noise Distortion in Loudspeaker Systems” *129th AES convention San Francisco, November 2010*
- [5] Zwicker, E.; Fastl, H: “Psychoacoustics – Facts and Models”. *Springer, Berlin, 1999, ISBN 3-540-65063-6*