

Objective and Subjective Assessment of Regular Loudspeaker Distortion

Avaliação objetiva e subjetiva de distorções em alto-falantes regulares

Wolfgang Klippel, Robert Werner

Klippel GmbH, Dresden, Germany

Abstract

A major part of the signal distortion generated by loudspeaker systems are directly related with the geometry and properties of the material used in loudspeaker design and found in all good units passing the assembling line. Those regular distortions are the result of an optimization process giving the best compromise between perceived sound quality, maximal output, cost, weight and size. This paper discusses the physical causes of the regular distortions, their modeling by using lumped and distributed parameters, the objective assessment using modern measurement techniques and the perception by the human ear.

Resumo

A maior parte da distorção do sinal gerado por sistemas de alto-falantes estão diretamente relacionados com a geometria e com as propriedades do material utilizadas no projeto e são encontradas em todas as boas unidades passadas pela linha de montagem. Essas distorções regulares são o resultado de um processo de otimização que apresenta o melhor compromisso entre a qualidade do som percebido, a saída máxima, o custo, o peso e o tamanho. Este artigo discute as causas físicas das distorções regulares, suas modelagens usando parâmetros concentrados e distribuídos, a avaliação objetiva utilizando técnicas modernas de medição e a percepção do ouvido humano.

1. Introduction Introdução

The target of an audio reproduction system is to generate at the listening position an output signal $p_{out}(t)$ which is similar to the input signal $p_{in}(t)$ at the source point. The difference between the two time signals may be considered as a distortion signal $p_{dist}(t)=p_{out}(t) - p_{in}(t)$ generated somewhere in the audio chain. After introducing digital signal processing, transmission and data storage the weakest part is the electro-acoustical conversion (loudspeaker) and in the interaction with an acoustical environment (room).

O objetivo de um sistema de reprodução de áudio é gerar na posição de escuta um sinal de saída $p_{out}(t)$ semelhante ao sinal de entrada $p_{in}(t)$ no ponto de origem. A diferença entre os dois sinais do tempo podem ser considerados como um sinal de distorção $p_{dist}(t)=p_{out}(t) - p_{in}(t)$ gerado em algum lugar na cadeia de áudio. Após o início do processamento e da

transmissão do sinal digital e do armazenamento de dados, a parte mais fraca é a conversão electro-acústica (alto-falante) e a interação com um ambiente acústico (sala).

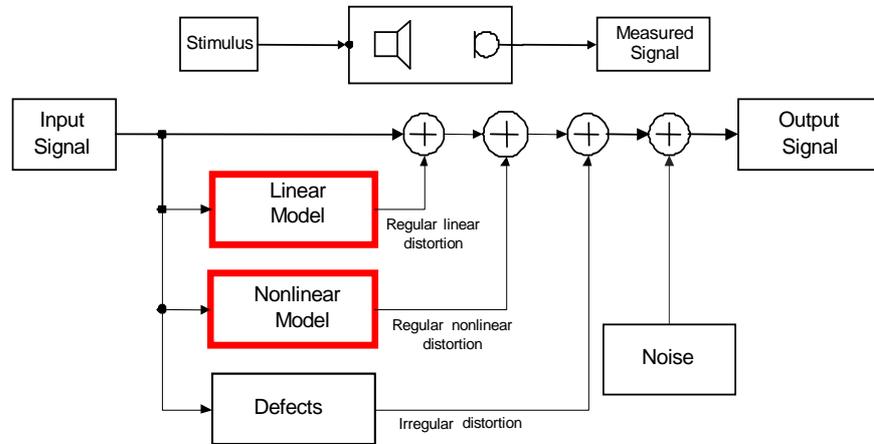


Figure 1: Signal flow diagram showing the generation of signal distortion in a loudspeaker system.

Figura 1: Diagrama de fluxo de sinal mostrando a geração de distorção do sinal em um sistema de alto-falante.

The generation of signal distortion can be modeled by a flow chart as shown in Fig. 1. It comprises a linear and a non-linear model, a black box system describing further defects and faults in the system and an independent noise source. The linear and the non-linear model describe the target performance of the loudspeaker which should be materialized in the golden reference units at the end of loudspeaker development. The outputs of the linear and non-linear models are regarded as regular distortions because they are accepted within the design process and are an result of optimization process giving the best compromise with other constraints (weight, size, cost, ...). Irregular distortions are generated by defects caused by the manufacturing process, ageing and other external impacts (overload, climate) during the later life cycle of the product. A rubbing voice coil, buzzing parts, loose particles and air leaks are typical loudspeaker defects which produce irregular distortions which are quit audible and not acceptable. A related paper [12] discusses the physical causes and measurement techniques in greater detail.

A geração de distorção do sinal pode ser modelada por um diagrama de fluxo, como mostrado na Fig. 1, composto de um modelo linear e outro não-linear, um sistema de caixa preta descrevendo outros defeitos e falhas no sistema e uma fonte de ruído independente. Ambos modelos descrevem o desempenho alvo do alto-falante, que deve ser materializado nas melhores unidades de referência no final do desenvolvimento do alto-falante. As saídas dos modelos lineares e não-linear são consideradas distorções regulares, pois são aceitas no processo de projeto e são resultado de um processo de otimização, resultando no melhor compromisso com outras restrições (peso, tamanho, custo, ...). As distorções irregulares são geradas por defeitos causados pelo processo de fabricação, envelhecimento e outros impactos externos (sobrecarga, clima) durante o ciclo de vida do produto. Uma bobina de voz raspando, algumas partes zumbindo, partículas frouxas e vazamentos de ar são defeitos típicos do alto-falante que produzem distorções irregulares audíveis e não aceitáveis. Um artigo relacionado [12] discute as causas físicas e as técnicas de medição em maior detalhe.

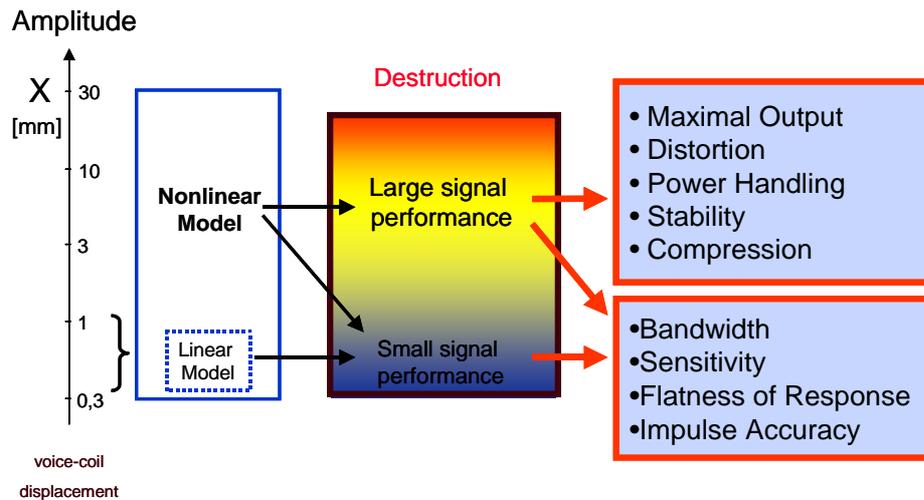


Figure 2: Prediction of the regular transfer characteristics of loudspeakers by using a linear and nonlinear model

Figura 2: Previsão das características de transferência regular de alto-falantes usando um modelo linear e um não-linear

This paper focuses on the regular distortions generated by the linear and non-linear models which are theoretical basis of the loudspeaker design process. Linear modeling based on lumped parameter modeling (Thiele/Small parameters) has a long history in loudspeaker design. More complex models using distributed parameters have been introduced to explain the cone vibration and sound radiation at higher frequencies. The linear modeling fails in describing the large signal performance of the loudspeaker which is directly related to maximal output and cost, size and weight of the loudspeaker. Therefore, modeling and direct measurement of loudspeaker nonlinearities is an important part of modern loudspeaker design.

Este artigo tem como foco as distorções regulares geradas pelos modelos lineares e não-lineares, que são a base teórica do processo de projeto do alto-falante. Uma modelagem linear baseada em parâmetros concentrados (parâmetros *Thiele/Small*) tem uma longa história no projeto de alto-falante. Modelos mais complexos utilizando parâmetros distribuídos foram introduzidos para explicar a vibração e a radiação do cone em frequências mais altas. A modelagem linear falha ao descrever o desempenho de grandes sinais do alto-falante que está diretamente relacionado com a saída máxima, com o custo, com o tamanho e com o peso do alto-falante. Portanto, a modelagem e a medição direta das não-linearidades do alto-falante é uma parte importante de um projeto moderno de alto-falante.

2. Linear Distortion Distorção linear

Table 1 gives an overview on dominant causes of linear distortion caused by transducer and system design and by the acoustical environment in the final application. The first causes are in the one-dimensional signal path close the input of the transducer which can be modeled by a network comprising lumped elements. Electrical measurements of voltage and current at the terminals gives the electrical impedance which is the basis for identifying basic lumped parameters and other derived Thiele/Small parameters which describe the properties of electrodynamic transducer, mechanical resonator and acoustical load.

A Tabela 1 apresenta uma visão geral das principais causas da distorção linear, causadas pelo transdutor, pelo projeto do sistema e pelo ambiente acústico na aplicação final. As primeiras causas estão no caminho unidimensional do sinal, perto da entrada do transdutor, que pode ser modelado por uma rede que compreende elementos concentrados. Medições elétricas de tensão e de corrente nos terminais geram a impedância elétrica, a qual é a base para a identificação dos parâmetros básicos concentrados e de outros parâmetros derivados *Thiele/Small*, os quais descrevem as propriedades do transdutor eletrodinâmico, do ressonador mecânico e da carga acústica.

Causes of Linear Distortion Causas da distorção linear	Measurements Medições	Characteristics Características
Fundamental mechanical resonator (coil, cone, suspension) Ressonador fundamental mecânico (bobina, cone, suspensão)	Voltage and current at terminals of driver operated in free air Tensão e corrente nos terminais de um <i>driver</i> operado ao ar livre	Resonance frequency, loss factor, moving mass, stiffness, compliance Frequência de ressonância, fator de perda, massa em movimento, rigidez, compliancia
Electrical input impedance (voice coil, iron path, magnet) Impedância elétrica de entrada (bobina móvel, caminho de ferro, imã)		dc resistance, inductance Resistencia DC, indutância
Acoustical load (baffle, enclosure) Carga acústica (<i>baffle</i> , gabinete)		Acoustical impedance, box volume, port resonance Impedância acústica, volume da caixa, ressonância do duto
Partial mechanical vibration (diaphragm, dust cap, surround) cone, diaphragm Vibração mecânica parcial (diafragma, capa de proteção, borda, cone, diafragma)	Displacement of radiator's surface Deslocamento da superfície do radiador	Accumulated acceleration AAL, natural frequencies, modal loss factor, modal functions Aceleração acumulada AAL. Frequências naturais, fator de perda modal, funções modais
Sound Radiation (radiator's surface, horn) Radiação sonora (superfície do radiador, corneta)	Sound pressure radiated by loudspeaker into anechoic environment Pressão sonora radiada pelo alto-falante em ambiente anecóico	Far field SPL response, polar plot, sound power response Resposta SPL em campo distante, diagrama polar, resposta da pressão sonora, indicador de diretividade
Diffraction (edges of the enclosure) Difração (bordas do gabinete)		
Early reflections (walls, floor, ceiling, panels) Primeiras reflexões (paredes, piso, teto, painéis)	Sound pressure at listening position Pressão Sonora na posição de escuta	Impulse response resposta do impulso
Room modes (room size and geometry) Modos na sala (tamanho da sala e geometria)		Frequency-time analysis (cumulative decay spectrum) Análise frequência-tempo (espectro com <i>decay</i> cumulativo)

Table 1: Overview on meaningful measurements for assessing the linear signal distortion generated in loudspeaker systems and identifying the physical causes.

Tabela 1: Visão geral das medições significativas para a avaliação da distorção linear do sinal gerado em sistemas de alto-falante e identificação das causas físicas.

At higher frequencies the radiator (cone or diaphragm) does not vibrate as a rigid body anymore but breaks up into higher-order modes. Here a more complex model using distributed parameters and multiple state variables such as the displacement $X(\mathbf{r})$ on sufficient points \mathbf{r} on radiator's surface is required. New mechanical measurements using laser scanning techniques provide the displacement and the geometry of the vibrating surface. The generated sound pressure in the near field or in the far field at the listening position depends not only from the sound radiation but also on the diffraction at the edges of the enclosure, early reflections on room boundaries and room modes. In micro-speakers, headphones, horn compression drivers the acoustical sound field may generate a force $F(\mathbf{r})$ at any point of the vibrating surface which is not negligible and may be also detected in the electrical signals at the terminals.

Em frequências mais altas, o radiador (cone ou diafragma) não vibra mais como um corpo rígido, mas divide-se em modos de ordem superior. Assim, é necessário um modelo mais complexo, o qual utilize parâmetros distribuídos e múltiplas variáveis de estado, como o deslocamento $X(\mathbf{r})$ em pontos \mathbf{r} suficientes na superfície do radiador. Novas medições mecânicas usando técnicas de varredura à laser fornecem o deslocamento e a geometria da superfície vibratória. A pressão sonora gerada no campo próximo ou no campo distante na posição de escuta depende não só da radiação do som, mas também da difração nas bordas do gabinete, das primeiras reflexões na sala e dos modos na sala. Em *micro-speakers*, fones de ouvido e *drivers* corneta, o campo de som acústico pode gerar uma força $F(\mathbf{r})$, não desprezível, em qualquer ponto da superfície vibratória e pode também ser detectado nos sinais elétricos dos terminais.

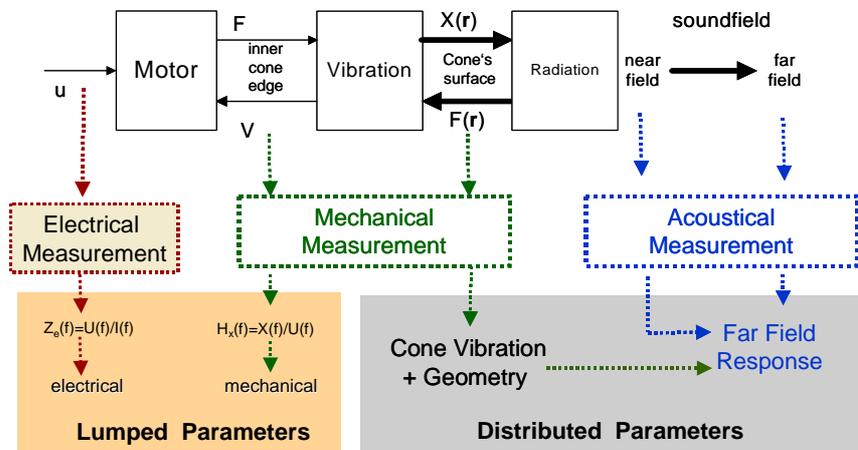


Figure 3: Modeling the small signal performance of loudspeaker systems by using lumped and distributed parameters

Figura 3: Modelagem do desempenho de pequenos sinais do sistemas de alto-falantes usando parâmetros concentrados e distribuídos

Traditional loudspeaker design and evaluation of transfer behavior was restricted to electrical and acoustical measurements as shown in Fig. 3. New cost effective laser sensors based on the triangulation principle [1] provide the geometry of the radiating surface at high accuracy and the linear transfer functions between terminal voltage and displacement $X(\mathbf{r})$ at sufficient points \mathbf{r} on the surface. Fig. 4 shows for example the result of such a scanning process collecting mechanical information at about 1000 measurement points. The

mechanical scanning process requires no anechoic room and may be applied to the drive unit operated in vacuum.

O projeto tradicional de alto-falantes e a avaliação do comportamento de transferência foram restritos a medições elétricas e acústicas, como mostrado na Fig. 3. Novos sensores à laser com custo efetivo, baseados no princípio de triangulação [1], fornecem a geometria da superfície radiante com alta precisão e as funções de transferência linear entre a tensão terminal e o deslocamento $X(r)$ em pontos r suficientes sobre a superfície. A Fig. 4 mostra, por exemplo, o resultado deste processo de varredura mecânica, coletando informações de aproximadamente 1000 pontos medidos. O processo de varredura mecânica não necessita de sala anecóica e pode ser aplicado para unidade de acionamento operada no vácuo.

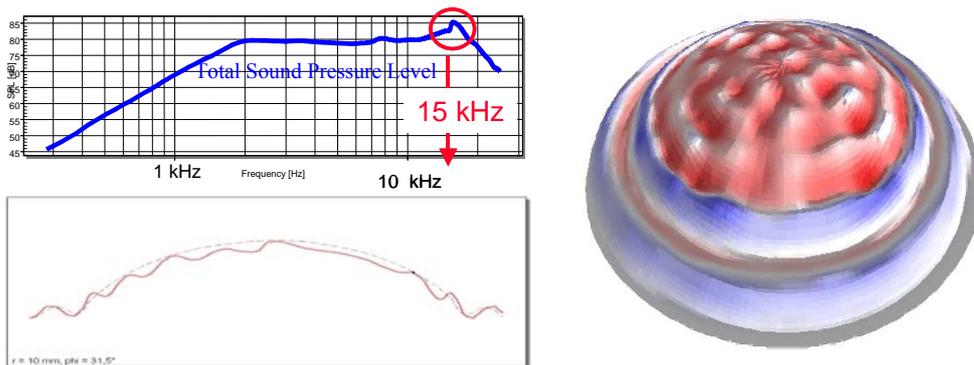


Figure 4: A critical vibration pattern depicted as a sectional view (left down) and as 3D animation (right) of a soft dome tweeter at 15 kHz causing a peak in the sound pressure on-axis response (upper left)

Figura 4: Um padrão de vibração crítico descrito com uma visão seccional (esquerda) e com animação em 3D (direita) de um tweeter com domo macio em 15 kHz causando um pico na resposta da pressão sonora no eixo (superior esquerda)

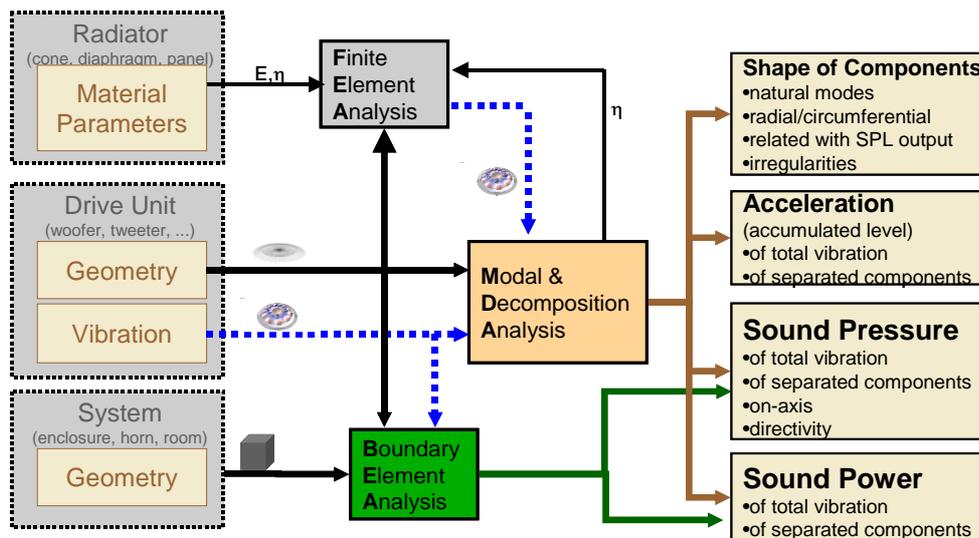


Figure 5: Vibration and radiation analysis using distributed loudspeaker parameters (geometry and vibration of the radiator's surface) measured by laser scanning techniques

Figura 5: Vibração e análise de radiação usando parâmetros de alto-falantes distribuídos (geometria e vibração da superfície do radiador), medidos por meio de técnicas de varredura à laser

Numerical calculation based on the scanned data provides the sound pressure on-axis or at any point in the far field giving the polar pattern of the loudspeaker as illustrated in Fig. 5. A new *Sound Pressure Related Decomposition Method* [2] shows how each part of the cone contributes to the sound pressure output in constructive or destructive way. This reveals acoustical cancellations effects, critical rocking modes and undesired circumferential modes. A *Modal Analysis* applied to the mechanical data simplifies the mechanical analysis and provides the modal loss factor η and other material parameters which are important input parameter for a *Finite Element Analysis* to investigate the design choices in greater detail. A *Boundary Element Analysis* may also consider the particular shape of the enclosure, horn or room boundaries to predict the sound field at high accuracy.

Cálculos numéricos baseados nos dados de varredura fornecem a pressão sonora no eixo ou em qualquer ponto no campo distante dando o padrão polar do alto-falante, como ilustrado na Fig. 5. Um novo método de decomposição da pressão sonora relacionada [2] mostra como cada parte do cone contribui para a saída de pressão sonora de forma construtiva ou destrutiva. Isso revela os efeitos de cancelamentos acústicos, modos de balanço críticos e modos circunferenciais indesejados. A Análise Modal aplicada nos dados mecânicos simplifica a análise mecânica e fornece o fator de perda modal η e outros parâmetros de entrada do material, importantes para uma Análise de Elementos Finitos para analisar as opções de projetos mais detalhadamente. A Análise de Elementos de Contorno também pode considerar uma forma particular do gabinete, da corneta ou do contorno da sala para prever o campo sonoro com alta precisão.

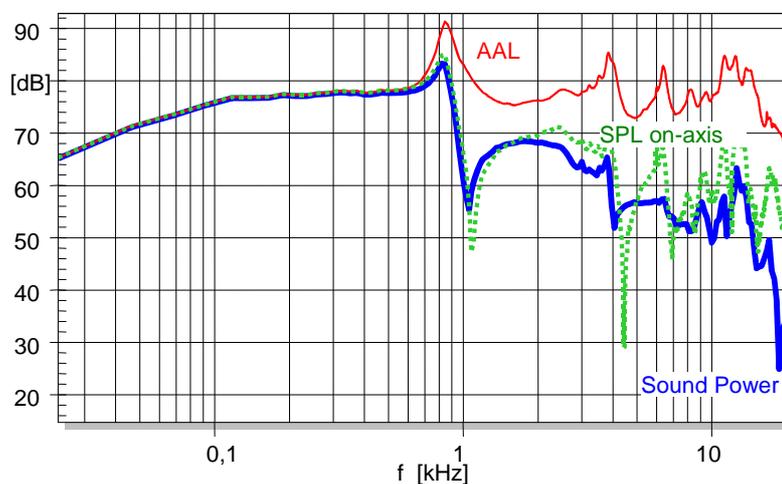


Figure 6: The most important loudspeaker characteristics in the small signal domain: Accumulated acceleration level (AAL) as thin line describes the mechanical vibration of the radiator's surface and is directly comparable with the on-axis sound pressure level (SPL) as dotted line and the total acoustical sound power response depicted as thick line.

Figura 6: As características mais importante do alto-falante no domínio de um sinal pequeno: Nível de aceleração acumulada (AAL), com linha fina, descreve as vibrações mecânicas da superfície do radiador e é comparada diretamente com o nível de pressão

sonora no eixo (SPL), com linha pontilhada, e com a resposta de potência sonora acústica total descrita como linha grossa.

Three curves calculated from the mechanical scanning data give the most condensed but almost comprehensive description of loudspeaker's small signal performance: The on-axis sound pressure response predicted in 1 m distance in the far field is depicted as a dotted line in Fig. 6. The thick line represents the sound power response of the loudspeaker and the thin line on the top shows with the accumulated acceleration level (AAL). The AAL corresponds with the total mechanical energy neglecting the phase information but normalized in such a way to be comparable with the acoustical output. It may be interpreted as the maximal acoustical sound pressure level while neglecting any acoustical cancellation. Therefore the AAL and SPL curves are identical at low frequencies (in Fig. 6 up to 800 Hz) where the loudspeaker cone vibrates in the rigid body mode and all points on the cone contribute to the sound pressure output constructively. However, at distinct frequencies such as 1.1, 4.4 and 7 kHz there are significant dips in the SPL output which are not found in the AAL. The difference between AAL and SPL curve describes the acoustical cancellation effect quantitatively. The AAL response comprises characteristic peaks which occur at the natural frequencies of the higher-order modes. The 3dB bandwidth of each "resonance peak" corresponds with the modal loss factor of the material used. At low frequencies the sound power response is most identical with both AAL and SPL responses because the loudspeaker dimensions are small compared to the wavelength and the radiator behave as an omnidirectional source.

As três curvas calculadas a partir dos dados de varredura mecânica apresentam uma descrição mais compacta, porém quase abrangente do desempenho do alto-falante de pequenos sinais: A resposta da pressão sonora no eixo prevista a 1m de distância no campo distante é retratada como uma linha pontilhada na Fig. 6. A linha grossa representa a resposta da potência sonora do alto-falante e a linha fina no topo mostra o nível de aceleração acumulada (AAL). A AAL corresponde à energia mecânica total desprezando-se a informação de fase, mas normalizada de forma a ser comparável com a saída acústica. Pode ser interpretada como o nível de pressão sonora acústica máxima ao desprezar qualquer cancelamento acústico. Portanto, as curvas AAL e SPL são idênticas em baixas frequências (na Fig. 6. até 800 Hz), onde o cone de alto-falante vibra no modo de corpo rígido e todos os pontos no cone contribuem para a saída de pressão sonora de forma construtiva. No entanto, em algumas frequências, tais como 1.1, 4.4 e 7 kHz, há quedas significativas na saída SPL, não são encontradas na AAL. A diferença entre a curva AAL e a SPL descreve quantitativamente o efeito de cancelamento acústico. A resposta AAL compreende picos característicos que ocorrem nas frequências naturais dos modos de ordem superior. A largura de banda de 3dB de cada "pico de ressonância" corresponde ao fator de perda modal do material utilizado. Em baixas frequências, a resposta de potência sonora é mais idêntica com ambas respostas, AAL e SPL, pois além das dimensões do alto-falante serem pequenas comparadas ao comprimento de onda, o radiador comporta-se como uma fonte uni-direcional.

3. Regular Nonlinear Distortion Distorção não-linear regular

Table 2 gives an overview on the physical causes of regular nonlinear distortion affecting the loudspeaker's large signal performance [3]. The dominant nonlinearities are in the motor and suspension part of the electro-dynamical transducer because the voice coil displacement is relatively large compared to the dimensions of the coil-gap configuration and size of the

corrugation rolls in the suspension (spider, surround). In micro-speakers, headphones and compression drivers the air flow in the gap may generate a nonlinear dependency of the mechanical resistance $R_{ms}(v)$ on velocity v . In vented-box loudspeaker systems there is a similar mechanism causing a nonlinear flow resistance $R_{ap}(v_p)$. High local displacement at the surround and particular regions on the cone activate nonlinearities in the modal vibration. A typical nonlinearity related to the sound radiation is the Doppler Effect where the high excursion of the bass signal changes the position of the cone and causing variation in the propagation time affecting high frequency components radiated from the radiator at the same time. In horn compression drivers the high sound pressure causes a gradual steeping of the waveform while the sound wave is traveling from the throat to the mouth of the horn.

A Tabela 2 apresenta uma visão geral das causas físicas da distorção não-linear regular, as quais afetam o desempenho do alto-falante de grandes sinais [3]. As não-linearidades dominantes estão no motor e na suspensão do transdutor eletro-dinâmico, pois o deslocamento da bobina móvel é relativamente grande em comparação com as dimensões da configuração de bobina-gap e com o tamanho dos rolos de ondulação na suspensão (aranha, borda). Em micro-speakers, fones de ouvido e drivers de compressão, o fluxo de ar no gap pode gerar uma dependência da resistência mecânica não-linear $R_{ms}(v)$ na velocidade v . Em sistemas de alto-falante com caixas ventiladas existe um mecanismo semelhante causando uma resistência de fluxo não-linear $R_{ap}(v_p)$. Um alto deslocamento da borda e de algumas regiões do cone, ativa as não-linearidades da vibração modal. Uma não-linearidade típica relacionada à radiação do som é o Efeito Doppler, onde a alta excursão dos sinais graves altera a posição do cone, causando variação no tempo de propagação e afetando as componentes de alta frequência radiadas pelo radiador ao mesmo tempo. Em drivers cornetas, a alta pressão sonora provoca uma inclinação gradual da forma de onda no caminho da garganta para a boca da corneta.

Causes of Nonlinear Distortion Causas da distorcao não-linear	Measurements Medições	Characteristics Características
Nonlinear force factor $Bl(x)$ and inductance $L_c(x)$, $L_c(i)$ of motor assembly (voice coil, iron path, magnet) Fator força não-linear $Bl(x)$ e indutancia $L_c(x)$, $L_c(i)$ da montagem do motor (bobina móvel, caminho de ferro, imã)	Voltage and current at loudspeaker terminals, sound pressure in the near field of the driver Tensão e corrente nos terminais do alto-falante, Pressão sonora no campo próximo do driver	Nonlinear parameters and large signal parameters (e.g. voice coil offset) Nonlinear symptoms for particular stimuli IMD, X_{DC} , MTD, THD, Compression Parametros não-lineares e parametros de grandes sinais (por exemplo, bobina móvel deslocada) Simtomas não-lineares para estímulos particulares IMD, X_{DC} , MTD, THD, Compressão
Nonlinear stiffness $K_{ms}(x)$ of mechanical suspension (surround and Spider) Rigidez não-linear $K_{ms}(x)$ da suspensão mecanica (borda e aranha)		
Nonlinear losses $R_{ms}(v)$ of mechanical and acoustical system Perdas não-lineares $R_{ms}(v)$ do sistema mecanico e acústico		
Nonlinear flow resistance $R_{ap}(v_p)$ of the air in the port of a vented system Resistencia de fluxo não-linear $R_{ap}(v_p)$ do ar no duto de um sistema ventilado	Sound pressure inside the vented enclosure Pressão sonora dentro de um gabinete ventilado	Compression of fundamental component at port resonance Compressão da componente fundamental no duto ressonante
Partial vibration of the radiator's surface (surround, cone, diaphragm, dust cap) Vibração parcial da superfície do radiador (borda, cone, diafragma, capa de proteção)	Sound pressure in near or far field Pressão sonora em um campo próximo ou	THD, IMD, MTD

	distante	
Doppler effect Efeito Doppler	Sound pressure in far field Pressao sonora no campo distante	IMD, MTD
Nonlinear sound propagation (wave steepening) in horns Propagação sonora não-linear (onda de maior inclinação) na corneta		IMD, THD, MTD

Table 2: Overview on meaningful measurements for assessing the regular nonlinear signal distortions generated in loudspeaker systems and identifying their physical causes.

Tabela 2: Visão geral de medições significativas para a avaliação regular das distorções de sinal não-lineares geradas em sistemas de alto-falante e identificação das suas causas físicas.

The effect of the dominant nonlinearities can be investigated by the lumped parameter model shown in Fig. 7. Contrary to a linear model some elements have not a constant parameter but depend via a nonlinear function on voice coil displacement x , velocity v , current i , sound pressure in box enclosure p_{box} or other state variables.

O efeito das não-linearidades dominantes pode ser analisado através do modelo de parâmetros concentrados, como na Fig.7. Ao contrário de um modelo linear, alguns elementos não tem um parâmetro constante, mas dependem de uma função não-linear da bobina móvel no deslocamento x , na velocidade v , na corrente i , na pressão sonora na caixa ou em outras variáveis de estado.

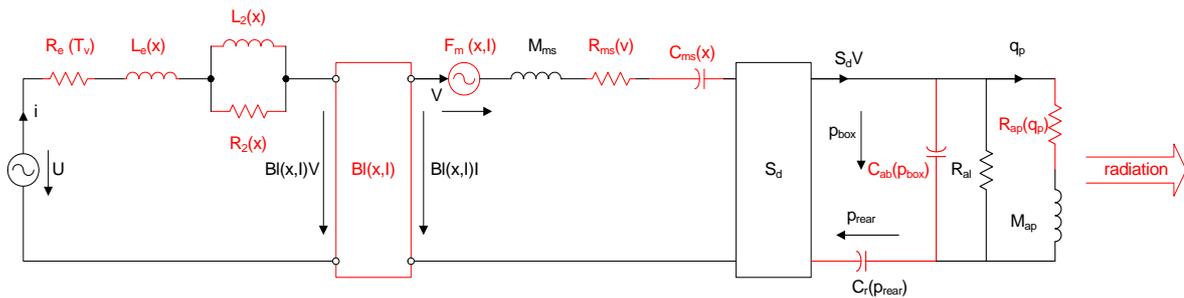


Figure 7: Lumped parameter model of a vented-box loudspeaker system considering the dominant nonlinearities in the electrical, mechanical and acoustical domain.

Figura 7: Modelo de parâmetro concentrado de um sistema de alto-falante com caixa ventilada, considerando-se as principais não-linearidades no domínio elétrico, mecânico e acústico

The shape of the nonlinear parameter characteristics are directly related to the geometry and properties of the material. Fig. 8 shows the nonlinear stiffness $K_{\text{ms}}(x)$ of the total suspension as the solid thick curve in the right diagram increasing at positive and negative displacements. This is very typical for any spider and surround when the shape of the corrugation rolls is deformed at high excursions.

A forma das características do parâmetro não-linear está diretamente relacionada com a geometria e com as propriedades do material. A Fig.8 mostra a rigidez não-linear $K_{\text{ms}}(x)$ da suspensão total, com linha sólida e espessa no diagrama direito, aumentando em deslocamentos positivos e negativos. Isto é bem típico de qualquer aranha e borda, quando a forma dos rolos de ondulação são deformados em altas excursões.

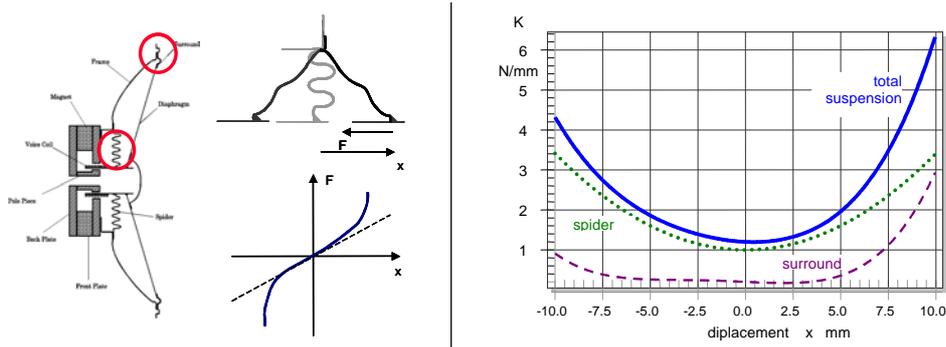


Figure 8: Nonlinear stiffness characteristic $K(x)$ versus displacement x of the mechanical suspension (surround and spider) dynamically measured by modern system identification using the electrical signals at loudspeaker terminals.

Figura 8: Característica da rigidez não-linear $K(x)$ versus o deslocamento x da suspensão mecânica (borda e aranha) dinamicamente medidos por um sistema de identificação usando os sinais elétricos nos terminais do alto-falante

The solid curve in Fig 8 also reveals an asymmetry in the stiffness characteristic which is caused by the asymmetrical shape of the surround which is more stiff and less compliant for positive than negative excursion. This asymmetry is an undesired property which causes not only 2nd- and higher-order distortion but generates also a dc displacement moving the coil to the softer side of the suspension. Nonlinearities may also cause an instability of the motor at frequencies above resonance.

The large signal performance is predictable and there is close relationship via the nonlinear parameters to the design.

A curva sólida na Fig. 8 também revela uma assimetria na característica da rigidez, que é causada pela forma assimétrica da borda, mais firme e menos conforme na excursão positiva do que na negativa. Esta assimetria é uma propriedade indesejada que provoca não só distorção de segunda ordem como de ordem superior, mas também gera um deslocamento DC que desloca a bobina para o lado mais suave da suspensão. As não-linearidades também podem causar uma instabilidade do motor em frequências superiores à ressonância.

O desempenho de grandes sinais é previsível e possui certa relação com os parâmetros não-lineares para o projeto.

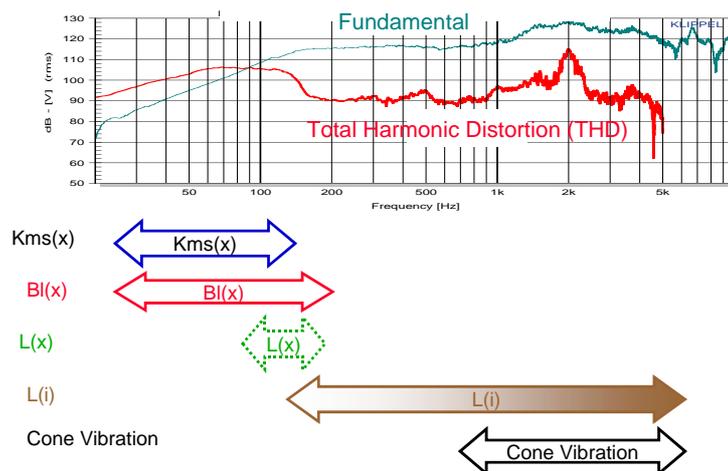


Figure 9: Relationship between the dominant loudspeaker nonlinearities (causes) and the total harmonic distortion (nonlinear symptom) generated by a single-tone swept continuously versus frequency

Figura 9: Relação entre as não-linearidades dominantes do alto-falante (causas) e a distorção harmônica total (sintoma não-linear) gerada por uma varredura contínua de único tom em função da frequência

The generation of nonlinear distortion and other symptoms depends on the properties of the stimulus. A single tone generates new spectral components at multiples of the fundamental frequency which can easily be measured by conventional harmonic distortion measurements. Fig. 9 shows the response of the total harmonic distortion (THD) and relationship to the physical causes. The high level of the harmonic distortion below 150 Hz is caused by voice coil displacement x activating the stiffness $K_{ms}(x)$ or force factor nonlinearity $Bl(x)$. The displacement varying inductance $L(x)$ can only generate low values of THD in a narrow frequency range just above resonance (150-200 Hz). The inductance nonlinearity $L(i)$ varying with current i may contribute to the THD at higher frequencies. The distinct peak in THD at 2 kHz is caused by a nonlinear vibration of the cone and surround after break-up.

A geração de distorção não-linear e de outros sintomas depende das propriedades do estímulo. Um único tom gera novas componentes espectrais em múltiplos da frequência fundamental, que podem ser facilmente medidas por medições convencionais de distorção harmônica. A Fig. 9 mostra a resposta da distorção harmônica total (THD) e sua relação com as causas físicas. O alto nível da distorção harmônica abaixo de 150 Hz é causado pelo deslocamento x da bobina móvel, ativando a rigidez $K_{ms}(x)$ ou a não-linearidade do fator força $Bl(x)$. O deslocamento variando a indutância $L(x)$ só pode gerar baixos valores de THD em uma estreita faixa de frequência logo acima da ressonância (150-200Hz). A não-linearidade da indutância $L(i)$ variando com a corrente i pode contribuir para o THD em frequências mais altas. O pico distinto de THD em 2kHz é causado por uma vibração não-linear do cone e da borda após o *break-up*.

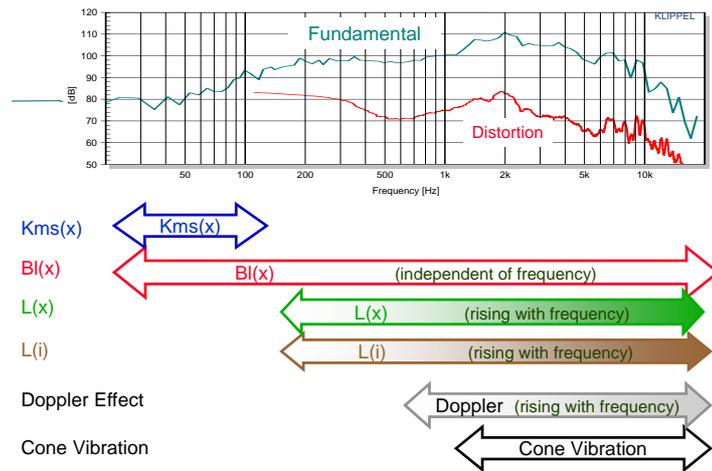


Figure 10: Relationship between the dominant loudspeaker nonlinearities (causes) and the nonlinear distortion generated by a sparse multi-tone stimulus

Figura 10: Relação entre as não-linearidades dominantes do alto-falante (causas) e a distorção não-linear gerada por um estímulo de multi-tons

Unfortunately, harmonic distortion measurement gives not a comprehensive picture of the large signal performance of loudspeaker systems. At least a second tone is required to generate intermodulation products which occur at difference and sum frequencies in all possible combinations of the excitation frequencies. Increasing the number of fundamental components in multi-tone stimulus will generate more and more intermodulation components spreading over the complete audio band. Contrary to the THD response in Fig. 9 the nonlinear force factor $Bl(x)$ and the inductance $L(x)$ THD generates significant intermodulation distortion at higher frequencies as illustrated in Fig. 10. Thus, harmonic distortion measurements using a single test tone are not sufficient for assessing loudspeakers comprehensively and predicting the large signal performance for complex stimuli like music.

Infelizmente, a medição da distorção harmônica não dá uma visão abrangente do desempenho de grandes sinais dos sistemas de alto-falantes, é necessário pelo menos um segundo tom para que sejam gerados produtos de intermodulação que ocorrem na diferença e na soma das frequências em todas as combinações possíveis das frequências de excitação. Aumentando-se o número de componentes fundamentais em estímulos de multi-tons, serão geradas cada vez mais componentes de intermodulação espalhando-se sobre toda a banda de áudio. Ao contrário da resposta THD na Fig. 9, o fator força não-linear $Bl(x)$ e a indutância $L(x)$ geram uma distorção por intermodulação significativa em frequências mais altas, como ilustrado na Fig. 10. Assim, as medições de distorção harmônica usando um único tom de teste não são suficientes para avaliar de forma abrangente alto-falantes e prever o desempenho de grandes sinais de estímulos complexos como a música.

4. Impact on Perceived Sound Quality Impacto na percepção da qualidade sonora

The reproduced sound quality as perceived by a listener is one of the most important criteria for the preference of an audio product. Systematic subjective evaluation requires a double-blind test strategy and psychometrical tools for assessing the sensations reliably and quantitatively. Such tests are time-consuming and expensive and the results depend on the particular listening condition (room, program material) and the training of the listeners.

A qualidade do som reproduzido, como é percebido por um ouvinte, é um dos critérios mais importantes para a preferência de um produto de áudio. A avaliação subjetiva sistemática exige uma estratégia de teste cego duplo e ferramentas psicométricas para avaliar as sensações de forma confiável e quantitativa. Tais testes são demorados e caros, e os resultados dependem da condição de escuta particular (sala de material do programa) e a formação dos ouvintes.

Thus it is desirable to predict those subjective sensations based on objective measurements and perceptive modeling considering the interactions between stimulus, loudspeaker, room, ear and the listener's training and expectations. There are two alternative approaches using different sources. One is based on personal listening experience, vague speculations or even myths. This reflects the heritage of accumulated knowledge which is difficult or impossible to verify by science. Exploiting this expertise is beneficial as long as it is combined with a critical attitude and some common sense. Wrong conceptions will die eventually and the falsification of those ideas are interesting research topics which accelerate this clarification.

Assim, é desejável prever as sensações subjetivas com base em medidas objetivas e modelagem perceptiva, considerando-se as interações entre o estímulo, o alto-falante, a sala, o ouvido com a formação do ouvinte e suas expectativas. Existem duas abordagens alternativas utilizando diferentes fontes. A primeira é baseada em experiência de escuta pessoal, especulações vagas ou até mesmo mitos. Isso reflete a herança de conhecimento acumulado que é difícil ou impossível de ser verificado pela ciência. Explorar essa experiência pode trazer benefícios, desde que seja combinada com uma atitude crítica e algum senso comum. Concepções erradas irão eventualmente morrer e a falsificação dessas idéias são tópicos de pesquisa interessantes que aceleram este esclarecimento.

The other approach is based on facts accumulated by psycho-acoustical research modeling the basic processing in the ear. Unfortunately, there are still many open questions how to apply the results of those fundamental experiments to sound reproduction of natural audio signals.

A outra abordagem é baseada em fatos acumulados pela pesquisa psico-acústica, modelando o processamento básico no ouvido. Infelizmente, ainda existem muitas questões em aberto de como aplicam-se os resultados dessas experiências fundamentais na reprodução de som de sinais de áudio naturais.

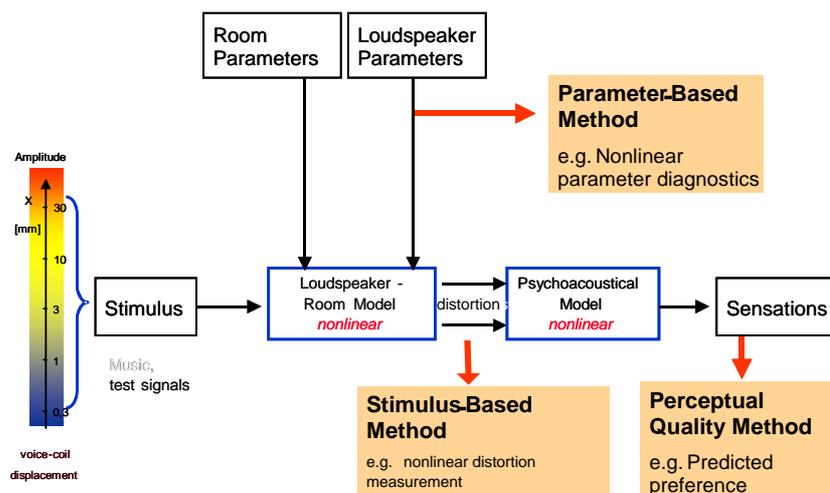


Figure 11: Objective methods for assessing the sound quality of loudspeaker systems.

Figura 11: Métodos objetivos para avaliar a qualidade sonora do sistema de alto-falantes

Fig. 11 gives an overview on the current objective methods on assessing the sound quality of loudspeaker systems. The *parameter-based method* relies on loudspeaker characteristics such as lumped and distributed parameters which are independent of the stimulus. The interpretation of harmonic distortion and other nonlinear distortion belongs to the *stimulus-based method* which considers the properties of a particular stimulus, position of the listening position and the influence of the acoustical environment. The linear and nonlinear distortions separated from undistorted stimulus are the input of the following psycho-acoustical model considering generating basic perceptual attributes (loudness, sharpness, roughness) and overall judgments describing the pleasantness of the sound and preference considering the ideal conceptions of the listener [10].

A Fig. 11 apresenta uma visão geral dos métodos de corrente objetivos na avaliação da qualidade sonora do sistema de alto-falantes. O método baseado em parâmetro depende de características do alto-falante, como parâmetros concentrados e distribuídos, que são independentes do estímulo. A interpretação da distorção harmônica e de outras distorções não-lineares pertence ao método baseado em estímulo, no qual considera-se as propriedades de um determinado estímulo, a posição de escuta e a influência do ambiente acústico. As distorções lineares e não lineares separadas dos estímulos sem distorções são a entrada do modelo psico-acústico seguinte, considerando a geração de atributos perceptuais básicos (sonoridade, nitidez, aspereza) e julgamentos gerais descrevendo a agradabilidade do som e de preferência, considerando as concepções ideais do ouvinte [10].

The psycho-acoustical model performs a binaural nonlinear processing where a significant part of the distortion component is masked by other signal components. Below the main mechanisms are summarized and consequences for interpreting objective measurements are discussed:

O modelo psico-acústico executa uma não-linearidade binaural processada, onde uma parte significativa da componente de distorção é mascarada por outras componentes do sinal. Abaixo estão resumidos os principais mecanismos e são discutidas suas consequências na medição da interpretação objetiva:

- Spectral components within third-octave bandwidth contribute to the same excitation level above 400 Hz. → Smoothed amplitude response describes the perception of stimuli having a dense spectrum (e.g. pink noise). The shape of a resonance (gain, Q factor) has a minor influence on audibility as long as the excitation within the critical band is constant [6].
- Componentes espectrais dentro de um terço de oitava de banda contribui com o mesmo nível de excitação acima de 400Hz → Resposta em amplitude suavizada descreve a percepção do estímulo de espectro denso (por exemplo, ruído rosa). A forma da ressonância (ganho, fator Q) tem uma influencia menor na audibilidade quando a excitação de uma banda crítica é constante.
- Spectral components below 100 Hz contribute to the excitation level of one critical band. → Sufficient bass sensation can be generated by higher frequencies (60 ...100 Hz) when the very low frequency components (20 ...40 Hz) are attenuated by the cut-off frequency of the loudspeaker.
- Componentes espectrais abaixo de 100Hz contribuem com o nível de excitação de uma banda crítica → Sensação de grave suficiente pode ser gerada por frequências

mais altas (60...100Hz), quando as componentes de frequências bem baixas (20...40Hz) forem atenuadas pela frequência de corte da alto-falante.

- A variation larger than 1 dB in the excitation level within a critical band becomes audible.
- Uma variação maior que 1dB no nível de excitação em uma banda crítica torna-se audível.
- Spectral masking excites adjacent bands. → Dips in the frequency response are less audible than peaks. Nonlinear distortion components are masked by fundamental components [7].
- Mascaramento espectral excita bandas adjacentes → Quedas na resposta de frequência são menos audíveis do que os picos. As componentes de distorção não-linear são mascaradas pelas componentes fundamentais [7].
- Temporal masking → The rms-value (rather than the peak value) determines the audibility of the regular nonlinear distortion.
- Mascaramento temporal → O valor rms (ao invés do valor de pico) determina a audibilidade da distorção regular não-linear.
- Hearing threshold → Bass components are not audible if the listening level is too low. A small level difference of components close to the hearing threshold may cause a significant difference in perceived bass sensation and in the detection of nonlinear distortion.
- Limiar auditivo → As componentes baixas não são audíveis quando o nível de escuta é muito baixo. Uma pequena diferença no nível das componentes próximas ao limiar auditivo pode causar uma diferença significativa na percepção de graves e na detecção da distorção não-linear.
- Monaural processing is not very sensitive for phase shift of signal components processed in separate critical bands. → Phase distortion corresponding with a group delay variation of 0.4 ...2 ms within a critical band change the timbre and roughness of the sound.
- Processamento monoaural não é muito sensível para as fases deslocadas das componentes do sinal processado em bandas críticas separadas → A distorção de fase correspondente a uma variação de atraso do grupo em 0.4...2ms em uma banda crítica altera o timbre e a aspereza do som.
- Binaural processing [4] is sensitive for interaural level differences (1...2 dB) and time delay (50 μ s). → Latency and group delay response should be identical in the symmetrical channels of a multi-way system to avoid lateralization of the perceived sound image.
- Processamento binaural [4] é sensível à diferença do nível interaural (1...2dB) e ao tempo de atraso (50 μ s) → As respostas de latência e do atraso do grupo devem ser idênticas nos canais simétricos de um sistema de multi-caminhos, a fim de evitar uma lateralização da imagem sonora percebida.
- Precedence effect [4] maintains the primary image as long as the lateral reflections are sufficient low or the time delay is small. → Strong reflections after 80 ms are unpleasant and are perceived as echo,

- O efeito de precedência [4] mantém a imagem primária, desde que as reflexões laterais são baixas suficientes ou o atraso de tempo é pequena. \diamond As reflexões mais fortes depois de 80 ms são desagradáveis e são percebidos como eco,
- O efeito de precedência [4] mantém a imagem primária quando as reflexões laterais são baixas suficientes ou o atraso de tempo é pequeno. \rightarrow Fortes reflexões depois de 80ms são desagradáveis e percebidas como eco.
- Audible lateral reflections may generated a preferred sensation of spaciousness and a broadening of the primary image [13], the optimal delay and level depend on the properties audio signal (20 ms delay for speech or 40 ms for music and reflections having the same level as the direct sound). \rightarrow Early reflections as found in relatively small rooms improve sound quality, artificial generation of lateral reflections may be desired in an anechoic environment or small rooms (cars).
- As reflexões laterais audíveis podem gerar uma sensação de espaço preferida e uma ampliação da imagem primária [13], o atraso ideal e o nível dependem das propriedades do sinal de áudio (20ms de atraso para fala ou 40 ms para música e reflexões com o mesmo nível como o som direto). \rightarrow As primeiras reflexões como as encontradas em salas relativamente pequenas melhoram a qualidade do som. A geração artificial de reflexões laterais pode ser desejada em um ambiente anecóico ou em pequenos ambientes (carros).
- Adaptation [6] to the acoustical environment causes a variation of the ideal conceptions versus time. \rightarrow The listener becomes less sensitive to linear distortion caused by room and loudspeaker after some time.
- A Adaptação [6] para o ambiente acústico causa uma variação das concepções ideias versus o tempo \rightarrow O ouvinte torna-se menos sensível à distorção linear causada pela sala e pelo alto-falante depois de certo tempo.
- Intermodulation distortion is detected by the ear not only by exploiting spectral but also temporal clues. Amplitude modulation is much more audible than frequency modulation and is perceived as fluctuation (modulating bass tone $f_1 < 20$ Hz) or roughness at higher frequencies ($20 \text{ Hz} < f_b < 400$ Hz) or separated spectral components (> 400 Hz). \rightarrow Low amplitude intemodulation distortion at 1 ... 3 % caused by nonlinear force factor $Bl(x)$ and inductance $L(x)$ is detected as an unnatural roughness.
- A distorção por intermodulação é detectada pelo ouvido não só através da exploração do espectro, mas também nas **pistas** temporais. A modulação em amplitude é muito mais audível do que a modulação de frequência e é percebida como flutuação (modulação de tom grave $f_1 < 20$ Hz), aspereza em altas frequências ($20 \text{ Hz} < f_b < 400$ Hz) ou componentes espectrais separadas (> 400 Hz). \rightarrow Distorção por intermodulação de baixas amplitudes em 1 ... 3 % causada por um fator forca nao-linear $Bl(x)$ e pela indutancia $L(x)$ sao detectadas como uma aspereza artificial.

4.1.Auralization Techniques Técnicas de auralização

Although the perceptive modeling gives valuable insight into fundamental psycho-acoustical mechanisms and basic sound attributes, it is not very accurate in predicting the overall assessment of the perceived sound quality and in the preference of an audio product at the current state. The ideal conceptions of a listener highly depend on training, listening habits, fashion, cultural factors and artistic properties of the program material. Some linear and

nonlinear distortion are clearly audible but may be acceptable for a particular application and program material (popular music) or may even be perceived as interesting effect (artificial bass enhancement). The reliable evaluation of those criteria requires systematic listening tests using modern auralization techniques [8, 9].

Embora a modelagem perceptiva gere informações importantes sobre os mecanismos psico-acústicos fundamentais e sobre os atributos de som básico, ela não é muito precisa em prever a avaliação global da qualidade do som percebido e na preferência de um produto áudio no estado atual. As concepções de um ouvinte ideal dependem muito de treinamento, hábitos de escuta, fatores culturais e propriedades artísticas do material do programa. Algumas distorções lineares e não lineares são claramente audíveis, mas pode ser aceitáveis para uma determinada aplicação, um material de programação (música popular) ou pode mesmo ser percebida como um efeito interessante (valorização artificial de graves). A avaliação confiável desses critérios exige testes de audição sistemáticos usando técnicas modernas auralização [8, 9].

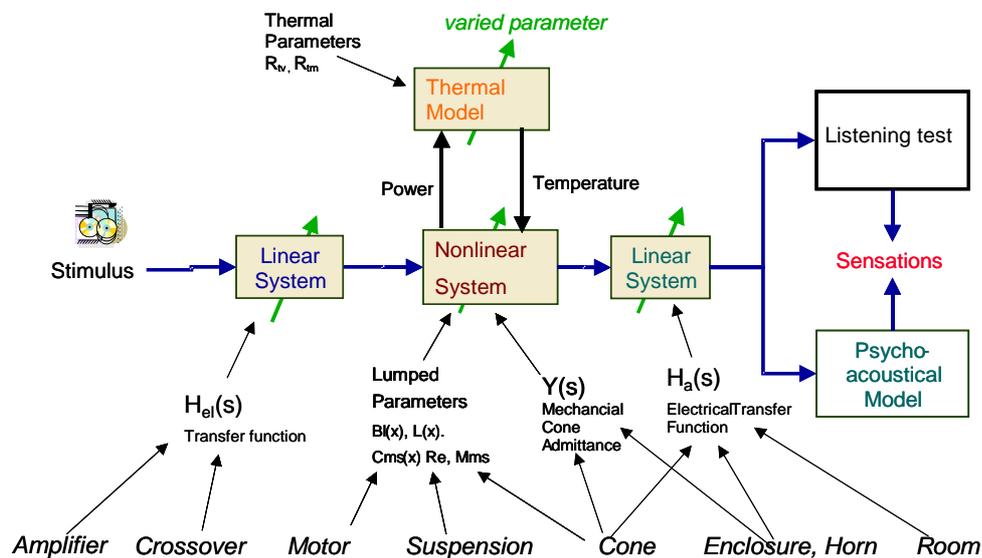


Figure 12: Simulation and auralization of loudspeaker distortion in reproduced audio signal based on linear and nonlinear modeling and using natural audio signals (music, speech) or artificial test signals.

Figura 12: Simulação e auralização da distorção do alto-falante no sinal de áudio reproduzido, baseado na modelagem linear e não-linear e usando sinais de áudio naturais (música, fala) ou sinais de testes artificiais.

Fig. 12 shows a digital signal processing system based on loudspeaker modeling to generate a virtual audio system. This model has a sandwich structure where a nonlinear system modeling the dominant nonlinearities in the electro dynamical transducer is embedded by linear systems. The first linear system corresponds with the electrical signal path from the source to the loudspeaker terminals while the second linear systems models the signal path in the mechanical and acoustical domain where the amplitude is relatively small and the sound propagation is sufficiently linear. This technique is a convenient tool for investigating design choices before a first prototype is made and combines subjective and objective evaluation.

A Fig.12 mostra um sistema de processamento digital do sinal baseado na modelagem do alto-falante para gerar um sistema de áudio virtual. Este modelo tem uma estrutura sanduíche, onde o sistema não-linear modelado nas não-linearidades dominantes no transdutor eletro-dinâmico é incorporado por sistemas lineares. O primeiro sistema linear corresponde ao caminho do sinal elétrico da fonte para os terminais do alto-falante, enquanto que o segundo sistema linear descreve o caminho do sinal no domínio mecânico e acústico, onde a amplitude é relativamente pequena e a propagação do som é suficientemente linear. Esta técnica é uma ferramenta ideal para analisar as opções de projetos antes que seja feito um primeiro protótipo e combina avaliação subjetiva e objetiva.

5. Conclusions Conclusões

Linear and nonlinear distortion is unavoidable in current electro-acoustical transducers using a moving coil assembly driving diaphragms, cones and other radiators. The regular distortion is deterministic and can be predicted by using linear and nonlinear models and identified loudspeaker parameters in an early design stage. Finding acceptable limits for those regular distortions is an important part in defining the target performance at the beginning of loudspeaker development. Subjective evaluation is required to assess the audibility and the impact on perceived sound quality. Some distortions which are audible might be still acceptable or even desirable in some applications. Systematic listening test, nonlinear auralization and objective assessment based on a perceptual model are useful tools to assess regular distortion.

As distorções lineares e não lineares são inevitáveis na corrente de transdutores electro-acústicos utilizando uma bobina móvel em conjunto com diafragmas, cones e outros radiadores. A distorção regular é determinista e pode ser prevista através de modelos lineares e não lineares e por parâmetros do alto-falante identificados em um estágio inicial do projeto. Encontrar os limites aceitáveis para tais distorções regulares é uma parte importante na definição do desempenho desejado no início do desenvolvimento do alto-falante. A avaliação subjetiva é necessária para avaliar a audibilidade e o impacto na percepção da qualidade sonora. Algumas distorções audíveis podem ser ainda aceitáveis ou até mesmo desejáveis em algumas aplicações. Teste de escuta sistemático, auralização não-linear e avaliação objetiva baseada em um modelo de percepção, são ferramentas úteis para avaliar a distorção regular.

6. References Referências

- [1] Klippel, W.; Schlechter, J.: “Distributed Mechanical Parameters of Loudspeakers Part 1: Measurement,” *J. Audio Eng. Society* 57, No. 9 pp. 696-708 (2009 Sept.)
- [2] Klippel, W.; Schlechter, J.: “Distributed Mechanical Parameters of Loudspeakers Part 2: Diagnostics,” *J. Audio Eng. Society* 57, No. 9 pp. 696-708 (2009 Sept.)
- [3] Klippel, W.: Tutorial: “Loudspeaker Nonlinearities - Causes, Parameters, Symptoms,” *J. Audio Eng. Society* 54, No. 10 pp. 907-939 (2006 Oct.)
- [4] Zwicker, E.; Fastl, H.: “Psychoacoustics – Facts and Models”. *Springer, Berlin, 1999, ISBN 3-540-65063-6*

- [5] Blauert, J.: "Spatial Hearing," Hirzel Verlag, MIT, 1997
- [6] Toole, F. E.; "Sound Reproduction", Focal Press, Amsterdam, 2008
- [7] Gäßler, G; "Die Grenzen der Hörbarkeit nichtlinearer Verzerrungen bei der Übertragung von Instrumentenklängen", *Frequenz, Volume 9 (1955), Nr. 1, pages 15–25*
- [8] Klippel, W: "Speaker Auralization – Subjective Evaluation of Nonlinear Distortion," *presented at the 110th Convention of the Audio Eng. Soc., Amsterdam, May 12-15, 2001, Preprint 5310, J. of Audio Eng. Soc., Volume 49, No. 6, 2001 June, P. 526. (abstract)*
- [9] Klippel, W: "Auralization – Subjective Evaluation of Speaker Distortion," *Fortschritte der Akustik - Plenarvorträge und Fachvorträge der 27. Jahrestagung für Akustik DAGA 01, Hamburg, 2001*
- [10] Klippel, W: "Multidimensional Relationship between Subjective Listening Impression and Objective Loudspeaker Parameters," *Acustica 70, Heft 1, S. 45 - 54, 1990*
- [11] Klippel, W: "Zusammenhang zwischen objektiven Lautsprecherparametern und subjektiver Qualitätsbeurteilung," *Beitrag in Angewandte Akustik 1, S. 46-101, Verlag Technik Berlin, 1987*
- [12] Werner, R.; Klippel, W.: "Measurement and Perception of Irregular Loudspeaker Defects", submitted to voice coil
- [13] Ando, Y.: "Subjective Preference in Relation to Objective Parameters of Music Sound Fields with a Single Echo," *J. Acoust. Soc. Am. 62, pp. 1436.*