

Loudspeaker Nonlinearities – Causes, Parameters, Symptoms

Alto falantes não lineares – Causas, Parâmetros, Sintomas

Wolfgang Klippel, Klippel GmbH, Dresden, Germany, klippel@klippel.de

ABSTRACT

This paper addresses the relationship between nonlinear distortion measurements and nonlinearities which are the physical causes for signal distortion in loudspeakers, headphones, micro-speakers and other transducers. Using simulation techniques characteristic symptoms are identified for each nonlinearity and presented systematically in a guide for loudspeaker diagnostics. This information is important for understanding the implications of nonlinear parameters and for performing measurements which describe the loudspeaker more comprehensively. The practical application of the new techniques is demonstrated on three different loudspeakers.

RESUMO

Este artigo aborda a relação entre as medições de distorção não-lineares e as não-linearidades, causas físicas para a distorção do sinal em alto-falantes, fones de ouvido, micro-falantes e outros transdutores. Técnicas de simulação, usando os sintomas característicos, são identificadas para cada não-linearidade e apresentadas sistematicamente em um guia para o diagnóstico de alto-falante. Esta informação é importante para a compreensão das implicações dos parâmetros não-lineares e para a realização das medidas que descrevem o alto-falante de forma mais abrangente. A aplicação prática das novas técnicas são demonstradas em três alto falantes diferentes.

1. INTRODUCTION INTRODUÇÃO

Loudspeakers and other kinds of actuators which produce sound or vibrations behave differently at small and high amplitudes. The dependency on the amplitude is an indication of nonlinearities inherent in the system. A second nonlinear effect is the generation of additional spectral components which are not in the exciting stimulus. Those components are generally integer multiples of the applied fundamentals and thus labeled as harmonic and intermodulation distortion. The results of those distortion measurements highly depends on the properties of the stimulus such as the selected frequency, amplitude and phase of the exciting tones. The results do not completely describe the large signal performance but should be understood as symptoms. This is the major difference to the small signal domain measurement results where a linear transfer function or impulse response describes the input/output relationship completely.

Alto-falantes e outros tipos de atuadores que produzem som ou vibrações, comportam-se diferentemente em amplitudes altas e baixas. A dependência da amplitude é uma indicação de

não-linearidades inerentes ao sistema. Um segundo efeito não-linear é a geração de componentes espectrais adicionais que não estão no estímulo excitante. Essas componentes são geralmente múltiplos inteiros dos fundamentos aplicados e, portanto, rotulados como distorção harmônica e de intermodulação. Os resultados dessas medições de distorção dependem altamente das propriedades do estímulo, como é o caso da frequência, da amplitude e da fase dos tons de excitação. Os resultados não descrevem completamente o desempenho do sinal grande, mas devem ser entendidos como sintomas. Esta é a maior diferença para o resultado medido no domínio do sinal de pequena amplitude, na qual uma função de transferência linear ou uma resposta de impulso descrevem toda a relação entrada/saída.

Measurements which rely on symptoms are problematic because they rise following questions:
Does the measurement technique activate and detect significant symptoms of the loudspeaker nonlinearity?
Are the symptoms meaningful?
How are they related to the physical causes?
How can we keep the measurement time and effort low while ensuring a comprehensive set of data?

Medições que dependem de sintomas são problemáticas pois levantam as seguintes questões:
A técnica de medição ativa detecta sintomas significantes de não-linearidade do alto-falante?
Os sintomas são significativos?
Como eles estão relacionados com as causas físicas?
Como podemos manter o tempo de medição e de baixo esforço, assegurando simultaneamente um conjunto abrangente de dados?

These questions will be addressed in the following paper. Answers will be derived from loudspeaker modeling and practical measurement results. First, the basic nonlinear mechanisms in loudspeakers are discussed. Next, traditional and new measurement techniques are summarized. After discussing general symptoms and their relationship with the nonlinear curve shape, the particular symptoms of dominant nonlinearities in loudspeakers are discussed systematically. A simple guide for assessing the large signal performance of loudspeakers is presented. This guide is then applied to diagnose three loudspeakers intended for home and automotive applications. Finally, conclusions are drawn for practical work and further research.

Essas questões serão abordadas no artigo seguinte. Estas respostas serão derivadas do modelo do alto-falante e dos resultados das medições práticas. Primeiramente serão discutidos, os mecanismos básicos não-lineares em alto-falante. Em seguida, serão resumidas as tradicionais e novas técnicas de medição. Depois de discutidos os sintomas gerais e sua relação com a forma da curva não-linear, serão discutidos, de forma sistemática, os sintomas particulares de não-linearidades dominante em alto-falantes. Um guia simples para avaliar o desempenho de grandes sinais de alto-falantes será apresentado, e então, aplicado para diagnosticar três alto-falantes destinados para residências e aplicações automotivas. Por fim, as conclusões são tiradas para o trabalho prático e futuras pesquisas.

2. GLOSSARY OF SYMBOLS ÍNDICE DE SÍMBOLOS

AMD	amplitude modulation distortion in percent distorção da modulação em amplitude, em percentagem
$Bl(x)$	is the effective instantaneous electro-dynamic coupling factor (force factor of the motor) defined by the integral of the permanent magnetic flux density B over voice coil length l . fator de junção eletro-dinâmico instantâneo efetivo (fator força do motor), definido pela integral da densidade de fluxo magnético permanente B sobre o comprimento da bobina móvel l
C	amplitude compression of the fundamental in dB compressão em amplitude da fundamental em dB
E	envelope of a time signal envelope de um sinal de tempo
$ETHD$	equivalent total harmonic distortion at the transducer's terminals in percent distorção harmônica equivalente total nos terminais do transdutor, em percentagem
EHD_n	equivalent nth-order harmonic distortion at the transducer's terminals in percent distorção harmônica equivalente de enésima ordem nos terminais do transdutor, em percentagem
f_s	resonance frequency frequência de ressonância
f_p	Helmholtz resonance of the port in vented systems ressonância de <i>Helmholz</i> do duto em sistemas ventilados
FT	Fourier transform transformada de <i>Fourier</i>
$F_m(x,I)$	electro-magnetic driving force (reluctance force) due to the variation of the inductance versus x , força motriz eletro-magnética (força de relutância) devido à variação da indutância <i>versus</i> x
HD_n	nth-order harmonic distortion in percent distorção harmônica de enésima ordem, em percentagem
$H(j\omega)$	linear transfer function função de transferência linear

$ICHD$	instantaneous crest factor of harmonic distortion in dB fator de crista instantâneo da distorção harmônica, em dB
IHD	instantaneous value of harmonic distortion component in percent valor instantâneo da componente de distorção harmônica, em percentagem
IMD_n	nth-order intermodulation distortion in percent distorção de intermodulação de enésima ordem, em percentagem
IMD_{total}	total harmonic intermodulation distortion in percent distorção harmônica total, em percentual
$i(t)$	the electric input current, corrente de entrada
$K_{ms}(x)$	mechanical stiffness of driver suspension which is the inverse of the compliance $C_{ms}(x)$, rigidez mecânica da suspensão do <i>driver</i> , inverso da $C_{ms}(x)$ observada
$L_e(x, i)$ $L_2(x, i)$ $R_2(x, i)$	lumped parameters depending on displacement x and current i required to model the para-inductance of the voice coil , parâmetros concentrados em função do deslocamento x e da corrente i necessários para modelar a para-indutância da bobina móvel

L_{AMD}	amplitude modulation distortion in decibel distorção de modulação em amplitude, em dB
$L_{HD,n}$	nth-order harmonic distortion in the sound pressure output signal in decibel distorção harmônica de enésima ordem no sinal de saída da pressão sonora, em dB
L_{THD}	total harmonic distortion in the sound pressure output in decibel distorção harmônica total na saída da pressão sonora, em dB
$L_{EHD,n}$	equivalent nth-order harmonic distortion in decibel distorção harmônica equivalente de enésima ordem, em dB
L_{ETHD}	equivalent total harmonic distortion in decibel distorção harmônica equivalente total, em dB
L_{THD}	equivalent total harmonic distortion in decibel distorção harmônica equivalente total, em dB
$L_{IMD,n}$	nth-order intermodulation distortion in the sound pressure output signal in decibel distorção de intermodulação de enésima ordem no sinal de saída da pressão sonora, em dB
$L_{IMD,total}$	total harmonic intermodulation distortion in the sound pressure output signal in decibel distorção harmônica de intermodulação total no sinal de saída da pressão sonora, em dB

M_{ms}	mechanical mass of driver diaphragm assembly including voice-coil and air load, massa mecânica da montagem do diagrama do <i>driver</i> , incluindo a bobina móvel e a carga de ar
$p(t)$	sound pressure output saída da pressão sonora
$P(j\omega)$	spectrum of sound pressure signal espectro da saída da pressão sonora
P_n	n th-order harmonic component in sound pressure componente harmônica de n ésima ordem na pressão sonora
P_t	rms-value of the total sound pressure signal valor em rms do sinal da pressão sonora total
$P_r(f_l, U_i)$	relative amplitude of the fundamental (referred to a voltage U_i) amplitude relativa da fundamental (referente à tensão U_i)
n	order of the distortion component ordem da componente de distorção
R_{ms}	mechanical resistance of driver suspension losses, resistência mecânica de perdas da suspensão do <i>driver</i>
$R_e(T_V)$	DC resistance of voice coil, resistência DC na bobina móvel
THD	total harmonic distortion in the sound pressure output in percent distorção harmônica total na saída da pressão sonora total, em percentual
$u(t)$	the driving voltage at loudspeaker terminals. tensão nos terminais do alto-falante
$u_D(t)$	equivalent input distortion considering all nonlinearities distorção equivalente de entrada considerando todas não-linearidades
$u'(t)$	total equivalent input voltage $u' = u + u_D$ tensão de entrada equivalente total
$v(t)$	velocity of the voice coil, velocidade da bobina móvel
$x(t)$	displacement of the voice coil, deslocamento da bobina móvel

$Z_m(s)$ mechanical impedance representing mechanical or acoustical load.
impedância mecânica representando a carga mecânica e acústica

3. LOUDSPEAKER MODELING MODELAGEM DO ALTO-FALANTE

At higher amplitudes all loudspeakers behave more or less nonlinearly generating signal components which do not exist in the input signal. There is a wide variety of nonlinear mechanisms occurring in loudspeaker systems and the research is mainly is focused on the “dominant nonlinearities” which

- limit acoustical output
- generate audible distortion
- indicate an overload situation
- cause unstable behavior
- are related to cost, weight, volume
- determine transducer efficiency
- affect loudspeaker system alignment

Em amplitudes mais altas todos os alto-falantes se comportam mais ou menos não linearmente, gerando componentes de sinal que não existem no sinal de entrada. Há uma grande variedade de mecanismos não-lineares que ocorrem em sistemas de alto-falante e esta pesquisa concentra-se, principalmente, nas "não-linearidades dominantes", cujas quais:

- limitam a saída acústica
- geram distorção audível
- indicam uma situação de sobrecarga
- causam um comportamento instável
- estão relacionados a custos, peso, volume
- determinam a eficiência do transdutor
- afetam o alinhamento do sistema de alto-falantes.

3.1. Regular Nonlinearities Não-linearidades regulares

Most of the dominant nonlinearities are caused by the transducer principle and are directly related with the geometry and material properties of the motor, suspension, cone and enclosure. Physical limits require a compromise but some of the nonlinearities are also intentionally made to get a desired large signal behavior (e.g. progressive stiffness). Thus, the design process yields transducers having regular nonlinearities which are found in any good unit passing the end-of-line test.

A maioria das não-linearidades dominantes são causadas pelo princípio do transdutor e estão diretamente relacionadas com a geometria e as propriedades do material do motor, da suspensão, do cone e do gabinete. Limites físicos exigem um compromisso, mas algumas das não-linearidades também são feitas intencionalmente para obter-se um comportamento desejado de um sinal grande (rigidez progressiva, por exemplo). Assim, os transdutores com uma não-linearidade regular, podem passar no teste final no processo de rendimento de projeto.

The most dominant regular nonlinearities found in woofers, tweeters, micro-speakers, horn compression drivers and loudspeaker systems are summarized in Table 1 and discussed in the following sections.

As não-linearidades regulares mais comuns são encontrados em *woofers*, *tweeters*, microfalantes, *drivers* cornetas e em sistemas de alto-falantes. Estes estão resumidos na Tabela 1 e são discutidos nas seções seguintes.

NONLINEARITY NÃO-LINEARIDADE	EFFECT EFEITO	MULTIPLIED TIME SIGNALS SINAIS DE MÚLTIPLOS TEMPOS
Stiffness $K_{ms}(x)$ of the suspension Rigidez $K_{ms}(x)$ da suspensão	nonlinear restoring force $F_s = K_{ms}(x)x$ força restauradora não linear $F_s = K_{ms}(x)x$	displacement x deslocamento x
Force factor $Bl(x)$ Fator força $Bl(x)$	driving force $F = Bl(x)i$ causes parametric excitation força motriz $F = Bl(x)i$ causa excitação paramétrica	displacement x current i deslocamento x corrente i

	back EMF $u_{EMF}=Bl(x)v$ causes nonlinear damping força contra eletro-motriz $u_{EMF}=Bl(x)v$ causa amortecimento não-linear	displacement x velocity v deslocamento x velocidade v
Inductance $L_e(x)$ (magnetic ac-field varies with coil position) Indutância $L_e(x)$ (campo magnético AC varia com a posição da bobina móvel)	time derivative of magnetic flux $\Phi_x=L(x)i$ produces back-induced voltage derivada temporal do fluxo magnético $\Phi_x=L(x)i$ produz tensão de volta induzida	displacement x current i deslocamento x corrente i
	additional reluctance force $F_m \sim i^2$ driving the mechanical system força de relutância adicional $F_m \sim i^2$ dirigindo o sistema mecânico	current i corrente i
Inductance $L_e(i)$ (magnetic ac-field changes permeability of the magnetic circuit) Indutância $L_e(i)$ (campo magnético AC varia com a permeabilidade do circuito magnético)	time derivative of magnetic flux $\Phi_i=L(i)i$ produces back-induced voltage derivada temporal do fluxo magnético $\Phi_i=L(i)i$ produz tensão de volta induzida	current i corrente i
Young's modulus $E(\varepsilon)$ of the material (cone, surround) Módulo de Young $E(\varepsilon)$ do material (cone, borda)	stress in the material $\sigma =E(\varepsilon)\varepsilon$ is a nonlinear function of strain <i>stress</i> no material $\sigma =E(\varepsilon)\varepsilon$ é uma função não-linear de tensão	strain ε tensão ε
geometrical transfer matrix Matriz de transferência geométrica	geometry is changed by mechanical vibration geometria é alterada por vibrações mecânicas	strain vector ε vetor tensão ε
Flow resistance $R_p(v)$ of the port in vented cabinets Fluxo de resistência $R_p(v)$ do duto em gabinetes ventilados	sound pressure inside the box is a nonlinear function of the air flow pressão sonora no interior da caixa é uma função não-linear do fluxo de ar	air velocity v in the port velocidade do ar v no duto
Doppler Effect (variation of the	variable time shift $\tau=x/c$ in	displacement x

cone position) Efeito Doppler (variação da posição do cone)	the propagated signal causes phase distortion variação do deslocamento do tempo $\tau = x / c$ no sinal propagado causa distorção de fase	(velocity v) sound pressure p deslocamento x (velocidade v) pressão sonora p
Nonlinear sound propagation Propagação não-linear do som	speed of sound $c(p)$ depends on pressure and causes wave steepening velocidade do som $c(p)$ depende da pressão e provoca onda de maior inclinação	sound pressure p pressão sonora p

Table 1 Overview of important regular nonlinearities in an electro-dynamic loudspeaker

Tabela 1 Resumo de importantes não-linearidades regulares em um alto-falante eletro-dinâmico

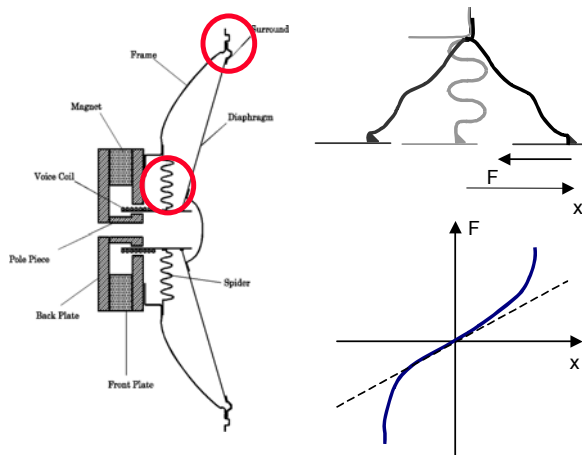


Figure 1: Suspension system in a conventional loudspeaker (sectional view) and the nonlinear force-deflection curve.

Figura 1: Sistema de suspensão em um alto-falante convencional (vista seccional) e a curva não-linear de força-deflexão

3.1.1. Nonlinear stiffness Rigidez não-linear

Loudspeakers use a suspension system to center the coil in gap and to generate a restoring force which moves the coil back to the rest position. Woofers usually have a suspension comprising a spider and a surround as shown in Figure 1 which allows movements in one direction only and suppresses rocking modes.

Alto-falantes usam um sistema de suspensão para centralizar a bobina no *gap* (entre-ferro) e gerar uma força restauradora que move a bobina de volta para a posição de repouso. *Woofers* geralmente têm uma suspensão formada por uma aranha e uma borda, como mostrado na Figura 1, que permite os movimentos em uma única direção e suprime os modos de balanço.

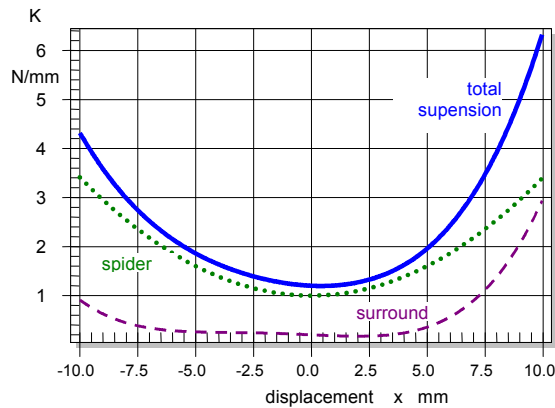


Figure 2: Stiffness of a progressive spider (dotted curve), a limiting surround (dashed curve) and the total suspension (solid curve)

Figura 2: Rigidez de uma aranha progressiva (curva pontilhada), uma borda limitada (curva tracejada) e da suspensão total (curva sólida)

Most suspension components are made of impregnated fabric, rubber or plastic molded into a particular shape. The suspension behaves like a normal spring and may be characterized by the force-deflection curve as shown in Figure 1. There is an almost linear relationship at low displacement but at high displacement the suspension responds with more force than predicted by a linear spring. In response to a slow ac-force the displacement generally follows with a hysteresis caused by losses in the material.

A maioria dos componentes da suspensão são feitos de tecido, borracha ou plástico maleável em uma forma particular. A suspensão comporta-se como uma mola normal e pode ser caracterizada pela curva de força-deflexão, mostrada na Figura 1. Há quase uma relação linear em pequenos deslocamentos, porém em grandes deslocamentos a suspensão responde com maior força que a prevista por uma mola linear.

The restoring force $F=K_{ms}(x)x$ may also be described as the product of displacement and nonlinear stiffness $K_{ms}(x)$. The stiffness $K_{ms}(x)$ corresponds with the secant between any point of the force-reflection curve and the origin. Since the stiffness is not constant but itself a function of the displacement x , the restoring force contains products of voice coil displacement. These terms produce nonlinear distortion in the time signal which are typical for the suspension. The stiffness also varies with frequency due to the visco-elastic behavior of the suspension material. However, this effect can be modeled by a linear systems [24].

Figure 2 shows the $K_{ms}(x)$ -characteristic of a spider with a progressive characteristic and a surround which limits the excursion at positive displacement.

A força restauradora $F=K_{ms}(x)x$ pode também ser descrita como um produto do deslocamento com a rigidez não-linear $K_{ms}(x)$. A rigidez $K_{ms}(x)$ corresponde a secante entre qualquer ponto da curva de força-deflexão e da origem. Como a rigidez não é constante, mas está em função do deslocamento x , a força restauradora irá conter produtos do deslocamento da bobina móvel. Estes termos produzem uma distorção não linear no sinal do tempo, típica para a suspensão. A rigidez também varia com a frequência devido ao comportamento visco-elástico do material da suspensão. Entretanto, esse efeito pode ser modelado por sistemas lineares[24].

A Figura 2 mostra a característica de $K_{ms}(x)$ de uma aranha com uma característica positiva e uma borda, a qual limita a excursão no deslocamento positivo.

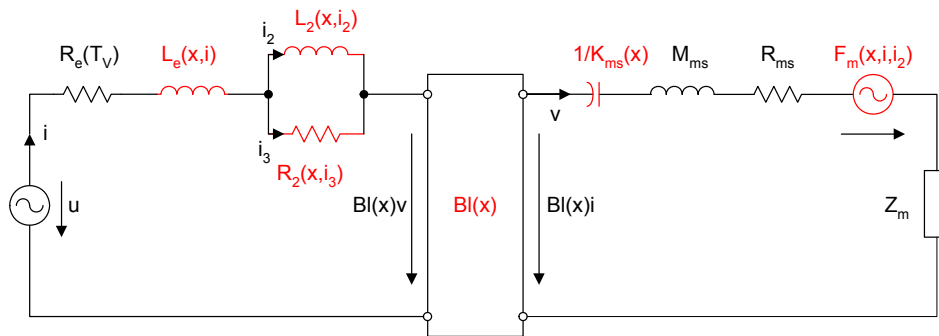


Figure 3: Electrical equivalent circuit of the loudspeaker considering motor and suspension system

Figura 3: Circuito elétrico equivalente de alto-falante, considerando motor e sistema de suspensão

3.1.2. Force Factor Fator força

The force factor $Bl(x)$ describes the coupling between mechanical and electrical side of lumped parameter model of an electro-dynamical transducer as shown in Figure 3. This parameter is the integral of the flux density B versus voice coil wire length l . The force factor $Bl(x)$ is not a constant but depends on the displacement x of the voice coil. Clearly, if the coil windings leave the gap the force factor decreases. The nonlinear function is static (no frequency dependency) and can be represented as a nonlinear graph, table or power series expansion.

O fator força $Bl(x)$ descreve o acoplamento entre o lado mecânico e elétrico dos modelos de parâmetros concentrados de um transdutor eletro-dinâmico, como mostrado na Figura 3. Este parâmetro é a integral da densidade de fluxo B versus o comprimento do fio da bobina móvel l . O fator força $Bl(x)$ não é uma constante, pois depende do deslocamento x da bobina móvel,

quando o enrolamento da bobina deixa o *gap*, o fator força diminui. A função não-linear é estática (não depende da frequência) e pode ser representada por um gráfico não-linear ou por uma tabela.

The shape of the $Bl(x)$ -curve depends on the geometry of the coil-gap configuration and the B -field generated by the magnet. Figure 4 illustrates an overhang configuration where the coil height h_{coil} is larger than depth h_{gap} of the gap. The corresponding $Bl(x)$ -curve is shown as a solid line in Figure 5. For small displacements the force factor value is almost constant because the same number of windings is in the gap. A coil height equal with the gap depth corresponds with the dashed curve in Figure 5 showing a force factor that decreases without a constant region at low amplitudes.

A forma da curva do $Bl(x)$ depende da geometria da configuração da bobina-*gap* e do campo B gerado pelo ímã. A Figura 4 ilustra uma configuração *overhang*, onde a altura da bobina h_{coil} é maior que a largura h_{gap} do *gap*. A curva $Bl(x)$ correspondente está representada com uma linha sólida na Figura 5. Para pequenos deslocamentos o valor do fator força é quase constante, pois há no *gap* o mesmo número de enrolamentos. Na Figura 5 está representada, com uma curva tracejada, uma bobina com as mesmas dimensões do *gap*.

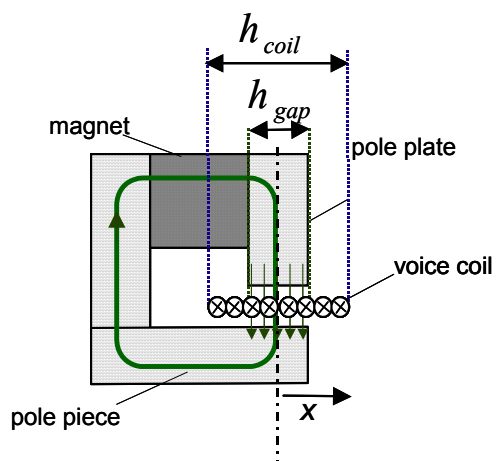


Figure 4: Motor structure of an overhang configuration

Figura 4: Estrutura do motor de uma configuração *overhang*

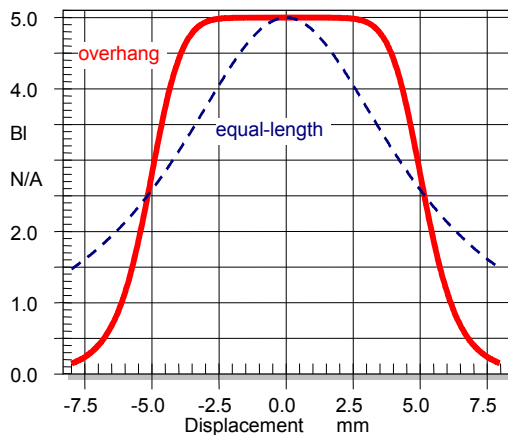


Figure 5: Force factor $Bl(x)$ of an overhang and equal-length coil-gap configuration

Figura 5: Força fator $Bl(x)$ de uma configuração *overhang* e de uma bobina-gap de mesmo comprimento

The force factor $Bl(x)$ has two nonlinear effects as listed in Table 1:

- As a coupling factor between electrical and mechanical domain any variation of $Bl(x)$ will affect the electro-dynamic driving force $F=Bl(x)i$. This mechanism is also called parametric excitation of a resonating system. High values of displacement x and current i are required to produce significant distortion.
- The second effect of $Bl(x)$ is the displacement dependency of the back EMF generated by the movement of the coil in permanent field. Here, the force factor $Bl(x)^2$ is multiplied with the velocity and causes variation of the electrical damping.

O fator força $Bl(x)$ tem dois efeitos não lineares, listados na Tabela 1:

- Com um fator acoplado entre o domínio elétrico e mecânico, nenhuma variação de $Bl(x)$ afetará a força motriz eletro-dinâmica $F=Bl(x)i$. Este mecanismo é também chamado de excitação paramétrica do sistema ressonante. Altos valores do deslocamento x e da corrente i são necessários para produzir uma distorção significativa.
- O segundo efeito de $Bl(x)$ é dependente do deslocamento da força contra eletro-motriz gerada pelo movimento da bobina no campo permanente. Neste caso, o fator força $Bl(x)^2$ é multiplicado pela velocidade, causando variação do amortecimento elétrico.

3.1.3.Voice coil inductance Indutância da bobina móvel

The electrical input impedance depends on the position of the coil. For example, Figure 6 shows the electrical input impedance versus frequency measured at three voice coil positions ($x=0$, clamped at $+7$ mm and -7 mm). Above the resonance at 70 Hz (which does not appear for a clamped voice coil) the electrical impedance is significantly higher for a negative displacement (coil in position) than at positive displacement (coil out position).

A impedância elétrica de entrada depende da posição da bobina. A Figura 6 mostra a impedância elétrica de entrada *versus* a frequência medida em três posições da bobina móvel ($x=0$, em +7 mm e em -7 mm). Acima da frequência de ressonância em 70 Hz (que não aparece para uma bobina presa), a impedância elétrica é significativamente mais alta para um deslocamento negativo (bobina na posição) do que para um deslocamento positivo (bobina fora da posição).

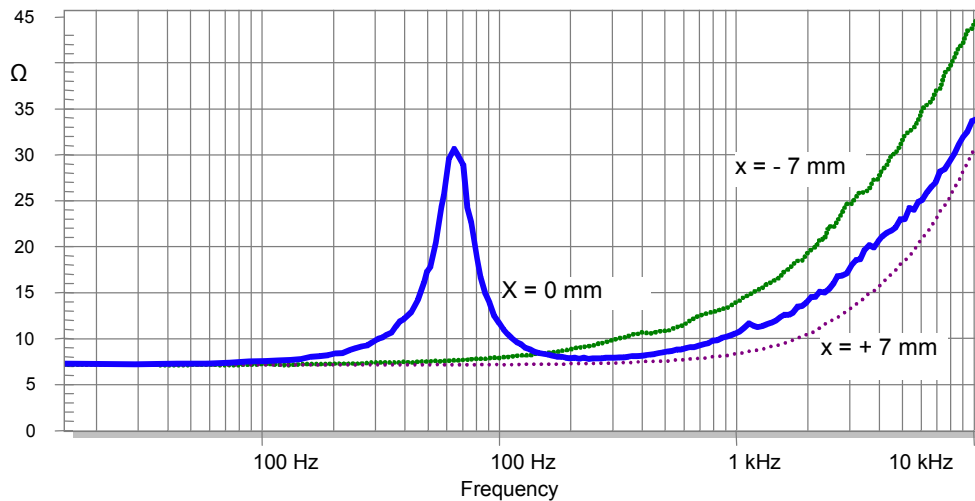


Figure 6: Electrical impedance measured at the rest position ($x=0$) and with clamped voice coil at positive and negative displacement.

Figura 6: Impedância elétrica medida na posição de descanso ($x = 0$) e com a bobina móvel presa no deslocamento positivo e negativo.

This property can be observed on many loudspeakers and can be explained by the displacement-varying inductance. The current in the voice coil produces a magnetic ac-field penetrating the magnet, iron and air as shown in Figure 7. The magnetic flux depends on the position of the coil and the magnitude of the current. If the coil is in free air above the gap the inductance is much lower than when operating the coil below the gap where the surrounding material is steel which decreases the magnetic resistance.

Esta propriedade pode ser observada em muitos alto-falantes e pode ser explicada por uma indutância de deslocamento variável. A corrente na bobina móvel produz um campo magnético AC penetrante no ímã, no ferro e no ar, como mostrado na Figura 7. O fluxo magnético depende da posição da bobina e da magnitude da corrente. Quando a bobina está ao ar livre acima do *gap*, a indutância é muito menor que quando operada abaixo do *gap*, onde a borda do material é de aço, e diminui a resistência magnética.

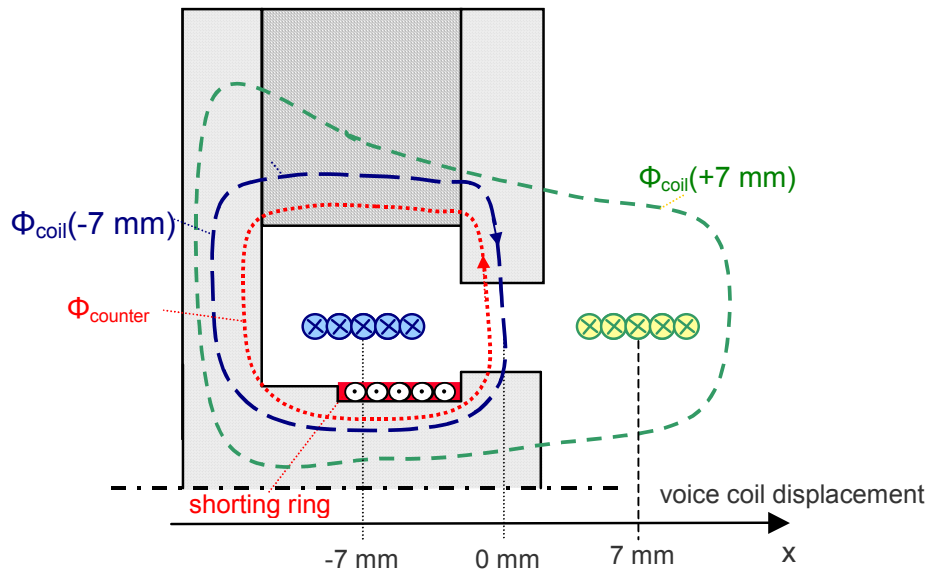


Figure 7: Motor structure of a conventional driver using a shunting ring on the pole piece.

Figura 7: Estrutura do motor de um *driver* convencional, usando um anel de curto-circuito na peça polar.

In addition to its dependence on displacement x the inductance also depends on the input current i . This is caused by the nonlinear relationship between magnetic field strength H and flux density (induction) $B = \mu(i)H$ as shown in Figure 8. With no current applied to the coil, the permanent magnet produces the field strength H_2 which determines the working point in the $B(H)$ -characteristic. A high positive current ($i = 10 \text{ A}$) increases the total field strength to H_3 where the iron is more saturated and the permeability μ is decreased. Conversely, at negative current ($i = -10 \text{ A}$) the total field strength is decreased, increasing the value of μ . The effect of the varying permeability $\mu(i)$, which is very dependent on the specific magnetic material, is also called "flux modulation". The ac current also generates a hysteresis loop which corresponds with the losses in the iron material during one period of a sinusoidal current.

Além de sua dependência do deslocamento x , a indutância depende também da entrada de corrente i . Isto é causado pela relação não linear entre a força do campo magnético H e a densidade de fluxo (indução) $B = \mu(i) H$, como mostrado na Figura 8. Sem corrente aplicada à bobina, o ímã permanente produz o campo de força H_2 , que determina o ponto de trabalho no $B(H)$. A alta corrente positiva ($i = 10$ A) aumenta a intensidade do campo total de H_3 , onde o ferro está mais saturado e a μ permeabilidade é decrescente. Por outro lado, com a corrente negativa ($i = -10$ A), a intensidade do campo total é decrescente, aumentando o valor de μ . O efeito da variação da permeabilidade $\mu(i)$, que é muito dependente do material magnético específico, também é chamado de "modulação de fluxo". A corrente AC também gera um ciclo de histerese, o que corresponde com as perdas no ferro durante um período de uma corrente senoidal.

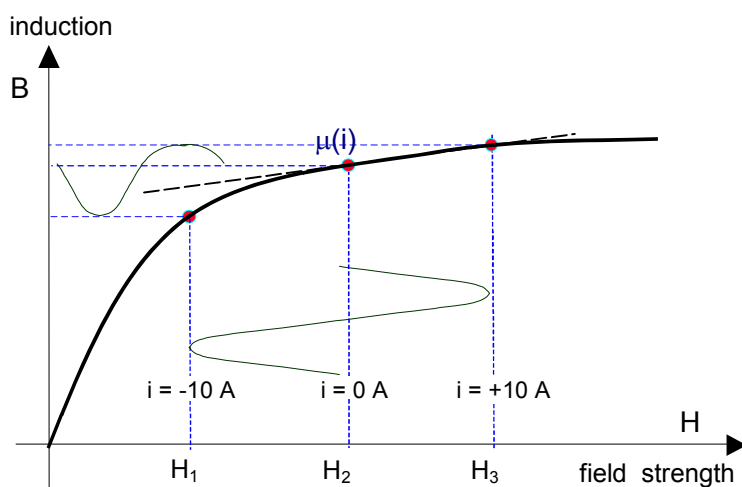


Figure 8: Flux density B versus magnetic field strength H of the magnetic circuit showing that the permeability $\mu(i)$ depends on the voice coil current i .

Figura 8: Densidade de fluxo B versus a força do campo magnético H do circuito magnético, mostrando que a permeabilidade $\mu(i)$ depende da corrente da bobina móvel i .

The magnetic ac-flux increases the impedance at higher frequencies as shown in Figure 6. This increase can not be described by an ideal inductance [2]. Special models (Leach [3], Wright [4], cascaded LR-network) are required to describe losses generated by eddy currents in the iron material. The discrete model using an inductance $L_e(x,i)$ in series with a second inductance $L_2(x,i)$ shunted by a resistor $R_2(x,i)$ as shown in Figure 3 is a good candidate for capturing the nonlinear dependence on displacement and current. The particular parameters depend on the frequency range over which the fitting is performed [5]. For most applications it is also convenient to use a simple approximation which neglects the nonlinear interactions between current and displacement. It uses the same nonlinear curve shape for the displacement-varying parameters

O fluxo magnético AC aumenta a impedância em altas frequências, como mostrado na Figura 6. Este aumento não pode ser descrito por uma indutância ideal [2]. Modelos especiais (*Leach* [3], *Wright* [4], rede LR em cascata) são necessários para descrever as perdas geradas por correntes parasitas no ferro. O modelo discreto usando uma indutância $L_e(x,i)$ em série, com uma segunda indutância $L_e(x,i)$, desviada por um resistor $R_2(x,i)$, conforme mostrado na Figura 3, é muito bom para capturar a dependência não-linear no deslocamento e na corrente. Os parâmetros específicos dependem da faixa de frequência em que a montagem é realizada [5]. Para a maioria das aplicações também é conveniente usar uma aproximação simples que despreza as interações não lineares entre a corrente e o deslocamento. Para os parâmetros de deslocamento variáveis é usada a mesma forma de curva não-linear:

$$\frac{L_e(x, i = 0)}{L_e(0)} \approx \frac{L_2(x, i = 0)}{L_2(0)} \approx \frac{R_2(x, i = 0)}{R_2(0)}$$

and the current varying parameters

e a mesma corrente dos parâmetros variáveis:

$$\frac{L_e(i, x = 0)}{L_e(0)} \approx \frac{L_2(i, x = 0)}{L_2(0)} \approx \frac{R_2(i, x = 0)}{R_2(0)} .$$

This approximation reduces the amount of data used in loudspeaker diagnosis and loudspeaker design calculations. The nonlinear characteristics of $L_e(x)$ versus displacement x and $L_e(i)$ versus i and the values $L_2(0)$ and $R_2(0)$ at the rest position $x=0$ are sufficient in most applications to describe the nonlinear characteristic of the para-inductance. For example, the Figure 9 shows the relationship between $L_e(x)$ and displacement, Figure 10 shows the dependency of the $L_e(i)$ versus current, respectively.

Esta aproximação reduz a quantidade de dados utilizados no diagnóstico de alto-falante e dos cálculos de projeto. As características não-lineares de $L_e(x)$ versus o deslocamento x e de $L_e(i)$ versus corrente i e os valores $L_2(0)$ e $R_2(0)$ na posição de repouso $x = 0$, são suficientes na maioria das aplicações para descrever a característica não-linear da para-indutância. Por exemplo, a Figura 9 mostra a relação entre $L_e(x)$ e o deslocamento, e a Figura 10 mostra a $L_e(i)$ em função da corrente, respectivamente.

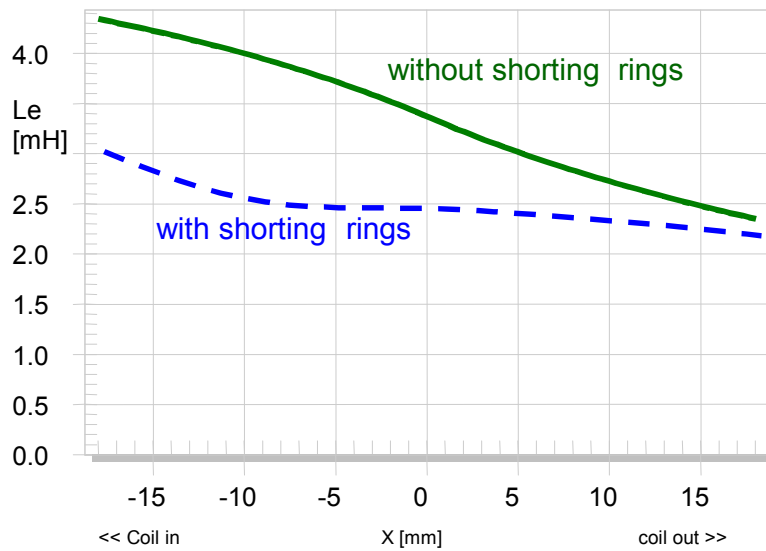


Figure 9: Voice coil inductance $L_e(x, i=0)$ versus displacement x for a motor with and without shorting rings

Figura 9: Indutância da bobina móvel $L_e(x, i=0)$ versus o deslocamento x para um motor com e sem anéis de curto-circuito

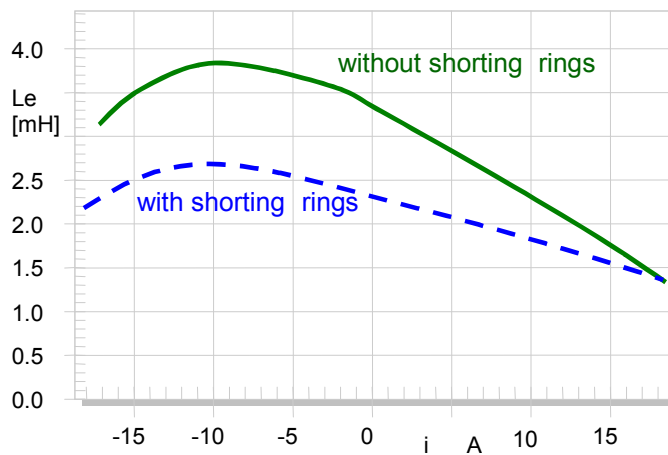


Figure 10: Voice coil inductance $L_e(i, x=0)$ versus voice coil current i with and without shorting rings

Figura 10: Indutância da bobina móvel $L_e(i, x=0)$ versus a corrente i com e sem anéis de curto-circuito

The inductance of the coil can be significantly reduced by placing conductive material (usually rings or caps made of aluminum or copper) on the pole piece or close to the coil as shown in Figure 7. The ac-field induces a current in the shorting material which generates a counter flux. This reduces the total flux and the inductance of the coil. This arrangement behaves similarly to a transformer which is shorted on the secondary side.

A indutância da bobina pode ser significativamente reduzida com a substituição do material condutor (geralmente anéis ou capas feitas de alumínio ou cobre) na peça polar ou perto da bobina, como mostrado na Figura 7. O campo AC induz uma corrente no material de curto-circuito, gerando um fluxo contrário. Isto reduz o fluxo total e a indutância da bobina. Este arranjo se comporta de forma semelhante à de um transformador de curto no lado secundário.

If the shorting material is placed at points where the inductance is maximal, the $L_e(x)$ -curve can be significantly linearized as shown by the dashed line in Figure 9. Shorting materials have also a positive effect on the $L_e(i)$ -characteristic because the ac-field is smaller and produces less flux modulation.

Se o material de curto for colocado nos pontos de indutância máxima, a curva $L_e(x)$ poderá ser significativamente linearizada, como demonstrado pela linha tracejada na Figura 9. Materiais de curto tem também um efeito positivo na característica da $L_e(i)$, pois o campo AC é menor e produz menos modulação de fluxo.

Table 1 summarizes the nonlinear effects and shows which time signals are multiplied with each other:

A Tabela 1 resume os efeitos de não linearidade e mostra como os sinais de tempo são multiplicados entre si.

- The first effect of the displacement varying inductance $L_e(x)$ is the back induced voltage in the electrical input circuit due to the time derivative of the magnetic flux and leads to the variation of the input impedance with coil displacement as shown in Figure 6. This effect is expressed with a multiplication of displacement and current. The same signals are involved in the parametric excitation of the $Bl(x)$ but there is an additional differentiation after the multiplication which enhances the amplitude of the components by 6dB/octave at higher frequencies.
- O primeiro efeito do deslocamento da indutância variável $L_e(x)$ é a tensão induzida de volta na entrada do circuito elétrico, devido ao tempo ser derivado do fluxo magnético, causa uma variação da impedância de entrada com deslocamento da bobina, como mostrado na Figura 6. Este efeito é expresso com uma multiplicação do deslocamento e da corrente. Os mesmos sinais estão envolvidos na excitação paramétrica do $Bl(x)$, mas há uma diferenciação adicional após a multiplicação, aumentando a amplitude das componentes em 6dB/oitava em frequências mais altas.

- The second effect is an additional reluctance force $F_m(x, i, i_2)$ which drives the mechanical system directly as shown in the equivalent circuit in Figure 3. It can be approximated by
- O segundo efeito é uma força de relutância adicional $F_m(x, i, i_2)$ que aciona o sistema mecânico diretamente, como mostrado no circuito equivalente na Figura 3, e pode ser aproximada por

$$F_m(x, i, i_2) \approx -\frac{i(t)^2}{2} \frac{\partial L_e(x)}{\partial x} - \frac{i_2(t)^2}{2} \frac{\partial L_2(x)}{\partial x}.$$

The reluctance force multiplies the local derivative of $L_e(x)$ with the squared current. The squarer is the dominant nonlinear operation and generates distortion in the full audio band. The reluctance force was the major driving force in electro-magnetic loudspeaker used 50 years ago. In today's electro-dynamic transducers the reluctance force is an undesired rudiment which should be kept as low as possible.

A força de relutância multiplica a derivada local de $L_e(x)$ com o quadrado da corrente, Esta operação não linear gera distorção em toda banda de áudio. A força relutante foi a principal força motriz no alto falante eletro-dinâmico usado há 50 anos, porém, nos transdutores eletro-dinâmicos atuais, a força de relutância é um rudimento indesejado que deve ser mantido o mais baixo possível.

- The dependency of $L_e(i)$ on current causes an ac-flux which depends on powers of i . Since the current is a broad band signal, distortion components are generated in the full audio band.
- A dependência de $L_e(i)$ pela corrente, causa um fluxo AC que depende da força da corrente i . Se a corrente pertencer a um sinal de banda larga, serão geradas componentes de distorção em toda banda de áudio.

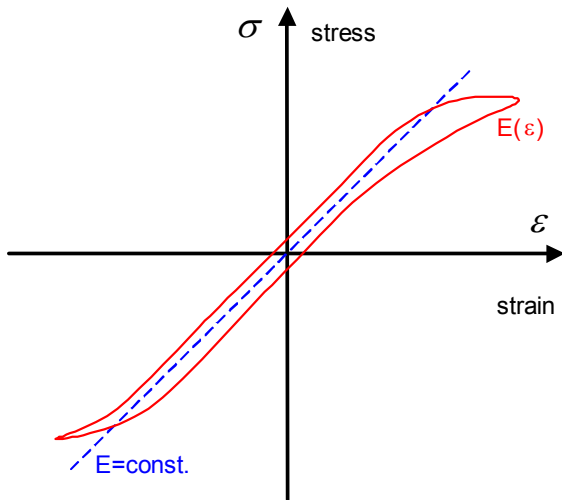


Figure 11: Nonlinear material properties as causes for nonlinearities in the mechanical system
 Figura 11: Propriedades não-lineares do material como causas para não-linearidades no sistema mecânico

3.1.4. Nonlinear Material properties Propriedades não-lineares do material

At low frequencies where the cone vibrates as a piston the suspension is the only nonlinear part of the mechanical system and can be described by a single lumped parameter $K_{ms}(x)$. At higher frequencies break-up modes occur on cone and other parts (voice coil former, dust cap). These vibrations become nonlinear if the strain and stress in the material is very high and Young's modulus $E(\varepsilon)$ varies with the strain ε .

Em frequências baixas onde o cone vibra como um pistão, a suspensão é a única parte não linear do sistema mecânico e pode ser descrita como um parâmetro concentrado simples $K_{ms}(x)$. Em altas frequências, ocorrem os modos *break-up* no cone e em outras partes (forma da bobina, capa de proteção). Estas vibrações tornam-se não-lineares caso a pressão no material seja muito alta e o módulo de *Young* $E(\varepsilon)$ varie com a deformação ε .

Nonlinear distortion is generated in the stress σ due to the multiplication of $E(\varepsilon)$ with the strain ε , and becomes maximal at distinct frequencies (Eigenfrequencies) where the modes produce high strain in the material [6].

Distorção não-linear é gerada na pressão σ , devido à multiplicação de $E(\varepsilon)$ com a deformação ε e torna-se máxima em diferentes frequências, onde os modos produzem alta distorção no material [6].

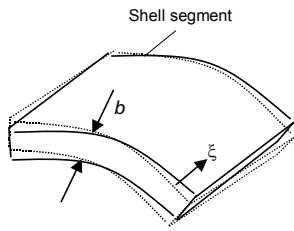


Figure 12: Variation of the cone geometry due to mechanical vibration
 Figura 12: Variação da geometria cone devido à vibração mecânica

3.1.5. Variation of Geometry Variação da geometria

More important than the variation of the E -modulus is the variation of the geometry of the mechanical system. The vibration becomes nonlinear if the displacement ζ is not small in comparison to geometrical dimensions (e.g. thickness b or curvature of the cone segment [7]) as illustrated in Figure 12.

Mais importante do que a variação do Módulo E , é a variação da geometria do sistema mecânico. A vibração torna-se não-linear quando houver grande deslocamento ζ em comparação com as dimensões geométricas (rigidez B ou curvatura do segmento do cone [7], por exemplo), como mostrado na Figura 12.

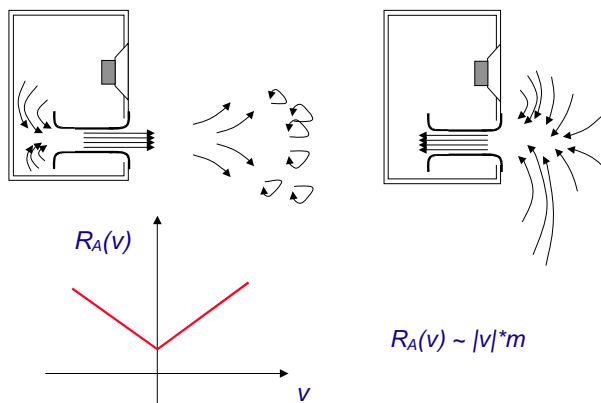


Figure 13: Nonlinear flow resistance depends on the air velocity
 Figura 13: Resistência de fluxo não-linear depende da velocidade do ar

3.1.6. Port nonlinearity Não-linearidade dos dutos

Ports in vented systems have a flow resistance which is not constant, but highly depends on the velocity v of the air inside the port [8]. At very low amplitudes the loss factor of a normal port is very high ($Q > 50$) but this values goes down to 10 and less for particle velocities above 20 m/s. The reason is that the air in the port does not vibrate as an **air plug** where all the air particles are bounded together. During the out-breathing phase the air is pushed in axis into the far field. In the following in-breathing phase other air particles resting around the orifice are accelerated and sucked into the port. The kinetic energy moved into the far field corresponds with the increase of the flow resistance for positive and negative air velocities as illustrated in Figure 13.

Os dutos, em sistemas de ventilação, tem uma resistência de fluxo não constante, porém estão totalmente em função da velocidade v do ar dentro deles [8]. Em amplitudes bem baixas o fator de perda de um duto normal é bem alto ($Q > 50$), mas diminuem para 10, ou até menos, em velocidades acima de 20m/s. Isto ocorre devido ao ar nos dutos vibrar diferentemente do ar no plug, onde as partículas estão totalmente limitadas. Durante a fase de expiração, o ar é empurrado no eixo para o campo distante. Na inspiração seguinte, outras partículas de ar ao redor do orifício são aceleradas e sugadas para dentro do duto. A energia cinética deslocada para o campo distante corresponde ao aumento da resistência de fluxo para velocidades positivas e negativas, como ilustrado na Figura 13.

The nonlinear flow resistance $R_p(v)$ generates low frequency components because the velocities are multiplied with each other. An asymmetry in $R_p(v)$ caused by the geometry of the orifices generates a dc-pressure in the box which may spoil the voice coil position and cause motor distortion.

A resistência de fluxo não linear $R_p(v)$ gera componentes de baixa frequência, pois as velocidades são multiplicadas entre si. Uma assimetria em $R_p(v)$, causada pela geometria do orifício, gera uma pressão DC na caixa que pode alterar a posição da bobina e causar distorção no motor.

A second nonlinear mechanism is the generation of turbulences in the air flow that behave as sound sources causing broad band noise in the output signal [9], [10].

O segundo mecanismo não linear é a geração de turbulências no fluxo do ar que comporta-se como uma fonte sonora, causando ruído de banda larga na saída do sinal [9], [10].

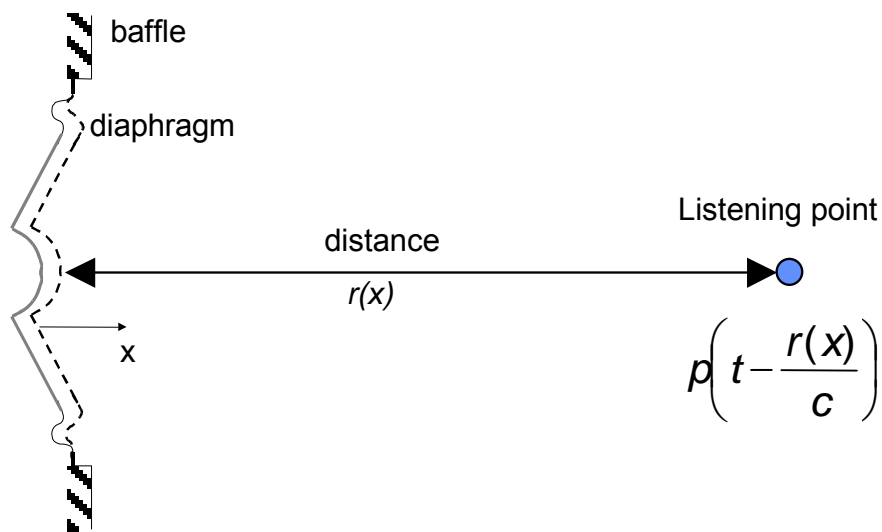


Figure 14: Phase modulation caused by varying distance between cone and listening point (Doppler Effect)

Figura 14: Modulação de fase causada pela variação da distância entre o cone e ponto de escuta (Efeito Doppler)

3.1.7. Doppler Effect Efeito Doppler

Variation of the position and geometry of the cone and surround does not only affect the mechanical vibration but also the acoustical radiation condition [11]. The Doppler Effect is the most dominant nonlinearity in this group. This effect may be explained as the change in wavelength as the result of motion (velocity) between source and receiver. This effect can also be described by the varying distance between the radiating surface (cone) and a listening point in axis caused by the displacement of the diaphragm generated by a low frequency component [12]. This causes a varying time delay in the transferred sound pressure signal which can be interpreted as a phase or frequency modulation. This is not very critical for the low frequency component itself but causes high intermodulation of high frequency signals with a short wavelength. This mechanism may be described by the product of displacement and differentiated sound pressure and requires low and high frequency components at the same time. The easiest way to avoid this distortion is to use a multi-way system with a sufficiently low crossover frequency between woofer and tweeter system.

A variação da posição e da geometria do cone e da borda não só afetam a vibração mecânica mas também a condição de radiação acústica [11]. O Efeito Doppler é a não linearidade mais dominante nesse grupo e pode ser explicado como uma mudança no comprimento de onda devido ao movimento (velocidade) entre a fonte e o receptor. Este efeito pode também ser descrito como uma distância variável entre a superfície do radiador (cone) e o ponto de escuta no

eixo, causado pelo deslocamento do diagrama, gerado por uma componente de baixa frequência [12]. Isto causa um atraso no sinal da pressão sonora transferido, podendo ser interpretado como uma modulação de fase ou de frequência. Isso não é muito crítico para a componente de baixa frequência em si, mas causa elevada intermodulação de sinais de alta frequência com um comprimento de onda curto. Este mecanismo pode ser descrito pelo produto do deslocamento e da pressão sonora diferenciada e requer componentes de baixas e altas frequências simultaneamente. A maneira mais fácil de evitar essa distorção é a utilização de um sistema *multi-way* com uma frequência de *crossover* suficientemente baixa entre o *woofer* e o *tweeter*.

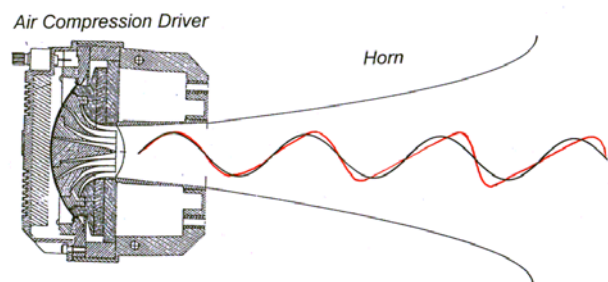


Figure 15: A sound wave propagating at high amplitudes causes a characteristic steepening of the wave front

Figura 15: A propagação de ondas sonoras em altas amplitudes causa uma maior inclinação da frente de onda

3.1.8. Wave Steepening Onda de maior inclinação

At high amplitudes a sound wave propagates at the maximum faster than at the minimum causing a gradual steepening of the wave front [13]. This mechanism is found in horn loaded compression drivers. The nonlinear mechanism is basically a multiplication of the sound pressure with the differentiated sound pressure in each section of the horn [14] - [16].

Em grandes amplitudes uma onda sonora propaga-se nos máximos mais rapidamente do que nos mínimos, causando uma gradual inclinação da frente de onda [13]. Este mecanismo é encontrado em *drivers* cornetas. O mecanismo não-linear é basicamente uma multiplicação da pressão de sonora com a pressão sonora diferenciada em cada seção da corneta [14] - [16].

3.2. Irregular Defects Defeitos irregulares

There are other sources of signal distortion in loudspeakers which are caused by defects such as a loose glue joint, a rubbing voice coil, a wire hitting the cone or loose particles in the gap.

Usually this is also a nonlinear mechanism because the output signal contains spectral components which are not in the input $u(t)$ and onset of the distortion depends highly on the amplitude of the stimulus.

Existem outras fontes de distorção do sinal em alto falantes que são causados por defeitos como junção de cola solta, atrito na bobina, fio batendo no cone ou partículas soltas no espaço. Geralmente estes também são mecanismos não lineares, pois o sinal de saída contém componentes espectrais, as quais não encontravam-se na entrada $u(t)$ e o início da distorção depende muito da amplitude do estímulo.

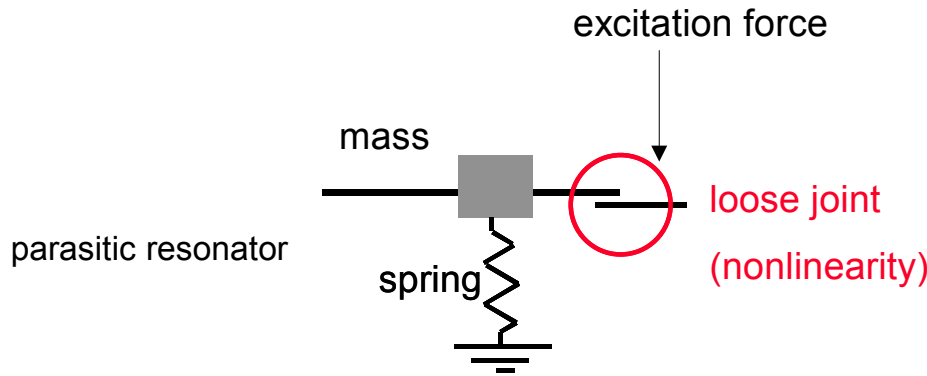


Figure 16: Mechanical model of a loudspeaker defect (glue problem)

Figura 16: Modelo mecânico de um defeito no alto-falante (problema de cola)

The example in Figure 16 illustrates the effect of a defective glue joint which causes a loose connection between the outer edge of the surround and the loudspeaker frame. The loose part of the surround is modeled by lumped elements (moving mass, spring, losses) forming a resonator with a high Q factor. The loose joint provides a nonlinear excitation which switches the driving force on and off depending on the direction of the displacement. If the joint is open, the mass-spring resonator oscillates at a resonance frequency f_o which is much higher than the exciting frequency f . The external stimulus initiates and synchronizes the oscillations and provides the required energy. Applying a sinusoidal excitation signal this system generates short bursts at certain time instances spaced periodically.

O exemplo da Figura 16 ilustra o efeito de uma junção de cola defeituosa, a qual provoca uma conexão frouxa entre a borda externa e a estrutura do altofalante. A parte solta da borda é modelada por elementos concentrados (massa em movimento, mola, perdas) formando um ressonador com um fator Q elevado. A junção frouxa fornece uma excitação não linear que alterna a força motriz dentro e fora, dependendo da direção do deslocamento. Se a junção estiver aberta, o ressonador massa-mola oscilará em uma frequência de ressonância f_o , muito maior do que a frequência de excitação f . O estímulo externo inicia e sincroniza as oscilações e fornece a energia necessária. Aplicando um sinal de excitação senoidal, este sistema gera rajadas curtas em certos instantes, espaçados periodicamente.

A more detailed analysis of the loose glue joint and other loudspeaker defects is not subject of this paper but are discussed elsewhere [17], [18].

Uma análise mais detalhada da junção de cola frouxa e outros defeitos do alto-falante não é o foco deste artigo, mas são discutidos em outros artigos [17], [18].

3.3. Measurement of model parameters **Medições de parâmetros modelos**

Modeling becomes practical if the free parameters of the model can be identified on a particular unit. The parameters of the lumped parameter model in Figure 3 can be measured by using static, incremental dynamic or full dynamic techniques as defined in the IEC standard [19]. The static and the incremental dynamic methods [21], [20] use a dc-part in the stimulus to operate the loudspeaker in a particular working point. However, only a full dynamic measurement technique [22], [23] operates the loudspeaker under normal working conditions and can use an audio-signal as stimulus. This is important for considering visco-elastic effects of the suspension [24] and for measuring the inductance $L_e(i)$ at high currents (> 30 Ampere) where heating of the coil may damage the loudspeaker. In this paper all large signal parameters are measured dynamically by using the system identification technique (LSI of the Distortion Analyzer [25]).

A modelagem torna-se prática quando os parâmetros livres do modelo podem ser identificados em uma unidade particular. Os parâmetros do modelo de parâmetros concentrados na Figura 3 podem ser medidos por meio de métodos estático, dinâmico incremental ou dinâmico completo, assim como definido na norma IEC [19]. Os métodos estático e dinâmico incremental [21] [20], usam uma parte DC no estímulo para operar o alto-falante em um determinado ponto de trabalho. No entanto, apenas no método de medição dinâmica completa [22] [23], o alto-falante pode operar em condições normais de trabalho e usar um sinal de áudio como estímulo. Isto é importante para considerar os efeitos visco-elásticos da suspensão [24] e para medir a indutância $L_e(i)$ em correntes elevadas ($> 30A$), onde o aquecimento da bobina pode danificar o alto-falante. Neste trabalho todos os parâmetros de grandes sinais são medidos dinamicamente, usando a técnica de identificação do sistema (LSI do Analisador de Distorção [25]).

3.4. Simulation of signal performance **Simulação de desempenho do sinal**

If the loudspeaker model is adequate and the free parameters are measured carefully, the behavior of the loudspeaker may be predicted for any input signal (synthetic test signal or music as stimulus). This kind of lumped parameter analysis [1] has the following advantages:

Quando o modelo do alto-falante é adequado e os parâmetros livres são medidos cuidadosamente, o comportamento do alto-falante pode ser previsto por um sinal de entrada (sinal de teste sintético ou música, como estímulo). Estes tipos de análise de parâmetros concentrados [1] possuem as seguintes vantagens:

The simulation does not need any sensor but gives access to all state variables of the system (sound pressure, current, displacement,..). It is also possible to separate nonlinear distortion of each nonlinearity from the linear output and to measure the magnitude of the distortion in an audio signal at any time [26]. Modeling is also the basis for a new auralization technique [27] which combines objective and subjective assessment of the large signal performance.

A simulação não precisa de sensor, mas permite acesso à todas variáveis de estado do sistema (pressão sonora, corrente, deslocamento...). Também é possível separar a distorção não-linear de cada não-linearidade da saída linear e medir a magnitude da distorção no sinal de áudio ao mesmo tempo [26]. A modelagem é também a base para uma nova técnica de auralização [27], que combina a avaliação objetiva e subjetiva do desempenho do sinal de grande amplitude.

4. MEASUREMENT OF SYMPTOMS MEDIÇÕES DE SINTOMAS

The traditional method of assessing the large signal performance is the measurement of special symptoms generated by the nonlinear system at high amplitudes [28]. Such symptoms are:

O método tradicional de avaliação do desempenho de grande sinais é através da medição de sintomas especiais gerados pelo sistema não-linear em altas amplitudes [28]. Tais como:

- generation of new spectral components in the output signal (which can be identified as harmonic, sub-harmonic and intermodulation components)
- Nonlinear relationship between the amplitude of the input and output amplitude of fundamental and distortion components (“nonlinear amplitude compression”)
- Generation of a dc-part in the state variables (e.g. dc-displacement) [30]
- Instabilities leading to bifurcation and jumping effects [29].
- Geração de novas componentes espectrais no sinal de saída (que pode ser identificado como harmônicas, sub-harmônica e componentes de intermodulação)
- Relação não linear entre a amplitude da entrada e a de saída das componentes fundamentais e de distorção ("compressão não-linear em amplitude")
- Geração de uma parte DC nas variáveis de estado (por exemplo, deslocamento DC) [30]
- Instabilidades levando à bifurcação e efeitos *jumping* [29].

Those symptoms give valuable information about:

Esses sintomas fornecem informações importantes sobre:

- deviation from linear behavior (almost linear, weak nonlinear or strong nonlinear behavior)
- physical nature of the nonlinearity (e.g. force factor)
- shape of the nonlinear characteristic
- quantitative identification of nonlinear parameters.

- desvio do comportamento linear (quase linear, não-linear fraco ou linear forte)
- a natureza física da não-linearidade (fator força, por exemplo)
- a forma da característica não-linear
- a identificação quantitativa de parâmetros não-lineares.

4.1. Critical stimulus Estímulo crítico

Symptoms are only generated if the nonlinearities are activated by an appropriate stimulus. Since the nonlinearities of the motor and suspension are relatively smooth curves, the loudspeaker behaves almost linearly for sufficiently small amplitudes. High displacement is required to cause significant variation of the force factor $Bl(x)$, inductance $L_e(x)$ and stiffness $K_{ms}(x)$. Therefore, the stimulus should provide sufficient energy at frequencies below $2f_s$ because the displacement decreases by 12 dB/octave above resonance frequency f_s . Detection of current-varying inductance $L_e(i)$ requires a signal which creates high voice coil current. Due to the electrical input impedance variation with frequency the current is high at low frequencies, becomes minimal at the resonance, increases to high values again at $2f_s$, and gradually decays at higher frequencies.

Os sintomas somente são gerados quando as não-linearidades forem ativadas por um estímulo apropriado. Caso as não-linearidades do motor e da suspensão sejam curvas relativamente suaves, o alto-falante irá comportar-se linearmente com amplitudes suficientemente pequenas. Altos deslocamentos são necessários para causar uma variação significativa no fator força $Bl(x)$, na indutância $L_e(x)$ e na rigidez $K_{ms}(x)$. Portanto, o estímulo deve fornecer energia suficiente em frequências abaixo de $2f_s$, pois o deslocamento decresce 12 dB/oitava acima da frequência de ressonância f_s . A detecção da indutância de corrente variável $L_e(i)$, exige um sinal que crie altas correntes na bobina móvel. Devido à variação da impedância elétrica de entrada com a frequência, a corrente é alta em baixas frequências, torna-se mínima na ressonância, eleva-se aos valores altos novamente em $2f_s$, e decai gradualmente em frequência mais altas.

The nonlinear terms in Table 1 which multiply two different time signals require a stimulus which produces high amplitudes of both state variables at the same time. In some cases this can not be accomplished by a single tone. For example the $L(x)$ -nonlinearity requires at least a low frequency tone for generating displacement and a high frequency tone for generating sufficient current. A two-tone stimulus has the advantage over a multi-tone signal in that the generated components can be separated in the frequency domain to simplify the identification and interpretation.

Os termos não-lineares na Tabela 1, os quais multiplicam dois sinais de tempo diferentes, requerem um estímulo que produz altas amplitudes de ambas variáveis de estado simultaneamente. Em alguns casos isto não pode ser acompanhado por um único tom. Por

exemplo, a não-linearidade $L(x)$ precisa de pelo menos um tom de frequência baixa, para gerar um deslocamento, e um de frequência alta, para gerar corrente suficiente. Um estímulo de dois tons tem a vantagem sobre um sinal multi-tom, no qual as componentes geradas podem ser separadas no domínio da frequência para simplificar a identificação e interpretação.

4.2. Monitoring of State Variables Monitoração das variáveis de estados

The sound pressure output measured by a micro

phone is, of course, the most natural candidate for monitoring the state of the loudspeaker. However, cone vibration radiation, the room and ambient noise have an influence on the acoustic signal. Monitoring the voice coil displacement by a triangulation laser sensor is a more direct way of observing the state of the suspension and motor. A considerable dc-component may be generated in the displacement by asymmetrical nonlinearities (rectification process). The input current is also a very informative state signal and can also be easily measured. The dynamic measurement of the large signal parameters in the LSI module [25] is based on monitoring electrical signals at the loudspeaker terminals only. Monitoring the voltage at the terminals is useful if the loudspeaker is operated via a high impedance amplifier (current source). Monitoring of velocity and cone acceleration can be accomplished by using an expensive Doppler laser system or an inexpensive accelerometer mounted on the cone.

A saída da pressão sonora medida por um com certeza, a forma mais natural para monitorar o estado do alto-falante. Entretanto, a radiação e vibração do cone, o ambiente e o ruído do ambiente tem uma influência no sinal acústico. Monitorar o deslocamento da bobina móvel por um sensor de triangulação à *laser* é o caminho mais direto de observar o estado da suspensão e do motor. Uma componente DC considerável pode ser gerada no deslocamento por não-linearidades assimétricas (processo de retificação). A corrente de entrada é também um sinal de estado bem informativo e pode ser facilmente medido. A medida dinâmica dos parâmetros de grandes sinais no módulo LSI [25] são baseados somente na monitoração dos sinais elétricos nos terminais do alto-falante. O monitoramento da tensão nos terminais são úteis quando o alto-falante for operado através de um amplificador de alta impedância (fonte de corrente).

4.3. Signal Analysis and Distortion Measures Análise de sinal e Medidas de distorção

A nonlinear system excited by a two-tone stimulus $u(t) = 1.4U_0 \sin(2\pi f_1 t) + 1.4U_0 \sin(2\pi f_2 t)$ with a first excitation tone at frequency f_1 and a second tone at f_2 generates a state variable (e.g. sound pressure $p(t)$) which is subjected to a spectral analysis (Fourier transform FT) giving the spectrum (e.g $P(j\omega) = FT\{p(t)\}$).

Um sistema não-linear excitado por um estímulo de dois tons $u(t) = 1.4U_0 \sin(2\pi f_1 t) + 1.4U_0 \sin(2\pi f_2 t)$, com o primeiro tom de excitação na frequência f_1 e o segundo tom na frequência f_2 , gera uma variável de estado (por exemplo, pressão sonora $p(t)$), que são submetidas a uma análise espectral (Transformada de *Fourier*), gerando um espectro (por exemplo, $P(j\omega) = FT\{p(t)\}$).

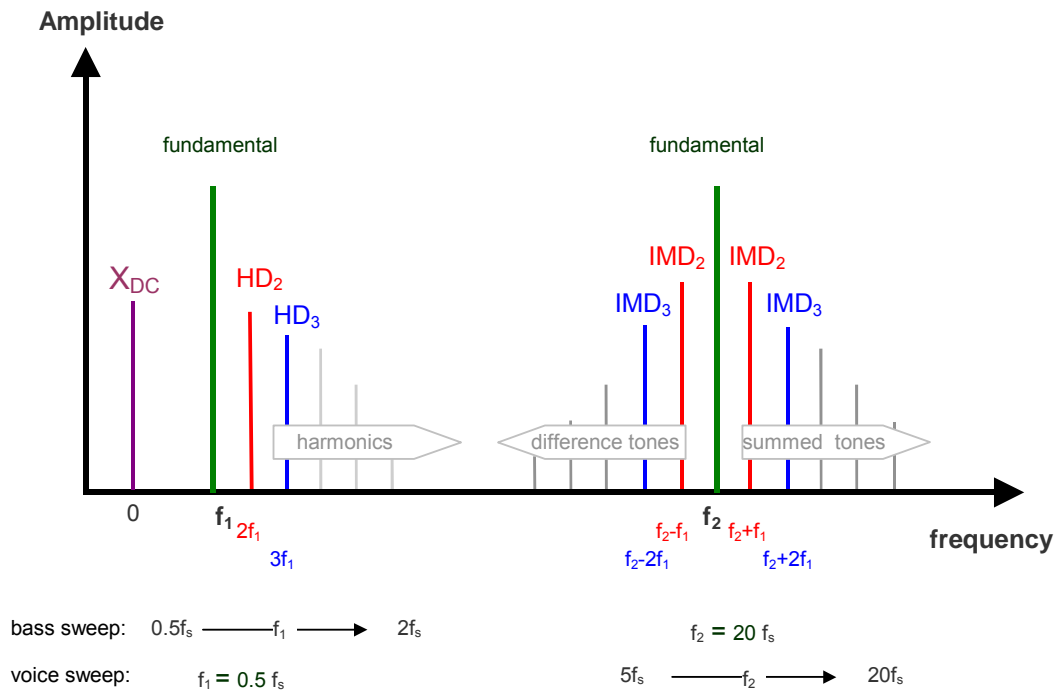


Figure 17 Spectrum of a state variable (e.g. sound pressure, displacement, current) generated by a two-tone stimulus

Figura 17: Espectro de uma variável de estado (por exemplo, pressão sonora, deslocamento, corrente) gerado por um estímulo de dois tons

If the distance between the two tones is sufficiently high ($f_2 \gg f_1$) the fundamental components, harmonic and intermodulation components are nicely separated and can be easily identified as illustrated in Figure 17.

Quando há distância grande suficiente entre duas componentes ($f_2 \gg f_1$), as componentes fundamentais, harmônicas e de intermodulação são bem separadas e podem ser facilmente identificadas, como ilustrado na Figura 17.

4.3.1. Fundamental Components Componentes Fundamentais

The complex spectrum $P(j\omega) = FT\{p(t)\}$ comprises the fundamental components $P(j\omega_1)$ and $P(j\omega_2)$. While performing a series of measurements with varied frequency f_1 the amplitude and phase response of the fundamental component can be measured in the frequency range of interest. In contrast to the linear transfer response measured at sufficiently small amplitudes, the large signal response depends on the amplitude and the spectral content of the stimulus. Thus the

second tone at f_2 may influence the amplitude of the output component $P(j\omega_1)$. In this paper all measurements of the fundamental components are performed with a single tone f_1 .

O espectro complexo $P(j\omega)=FT\{p(t)\}$ compreende as componentes fundamentais $P(j\omega_1)$ e $P(j\omega_2)$. Ao executar uma série de medições com frequência variável f_1 , a resposta em amplitude e em fase da componente fundamental pode ser medida na faixa de frequência de interesse. Em contraste com a resposta de transferência linear medida em amplitudes suficientemente pequenas, a resposta de grandes sinais dependem não só da amplitude, mas também do conteúdo espectral do estímulo. Assim, o segundo tom de f_2 pode influenciar a amplitude da saída da componente $P(j\omega_1)$. Neste artigo, todas as medições das componentes fundamentais são realizadas com um único tom f_1 .

Although the phase response changes significantly at higher amplitude it plays a minor role in loudspeaker diagnostics so far.

Embora a resposta de fase mude significativamente em maiores amplitudes, no momento ela não desempenha um papel importante nos diagnósticos de alto-falante.

More important is the relationship between input and output magnitude which reveals the nonlinear amplitude compression. In practice a series of measurements $i= 1, \dots N$ is performed while changing the amplitude of the input signal $U_o=i*AU$ and calculating the relative amplitude

Mais importante é a relação entre a magnitude de entrada e de saída, que revela a compressão não-linear em amplitude. Na prática uma série de medidas $i = 1, \dots N$ são realizadas durante a substituição da amplitude do sinal de entrada $U_o=i*AU$ e o cálculo da amplitude relativa

$$P_r(f_1, U_i) = \frac{|P(j2\pi f_1)|}{U_i} U_1. \quad (1)$$

The measure $P_r(f_1, U_i)$ is a convenient basis for comparing all measurements in one diagram and for calculating the amplitude compression

A medida $P_r(f_1, U_i)$ é uma base conveniente para a comparação de todas as medições em um diagrama e para o cálculo da compressão em amplitude

$$C(f_1, U_i) = 20 \lg \left(\frac{P_r(f_1, U_1)}{P_r(f_1, U_i)} \right). \quad (2)$$

4.3.2. Harmonic Distortion Distorção harmônica

The 2nd-order, 3rd-order and higher-order harmonic components $P_n(j\omega_1)=0.7P(nj\omega_1)$ with $n > 1$ appear at $2f_1$, $3f_1$ and multiples $nj\omega_1$ of the fundamental frequency f_1 . The harmonics of the second tone f_2 are at higher frequencies which are not shown in Figure 17. According to the IEC standard 60268-5 [31] the nth-order **H**armonic **D**istortion may be expressed in percent

As componentes harmônicas de 2^a, 3^a e de ordem superior $P_n(j\omega_1) = 0.7P(nj\omega_1)$, com $n > 1$ aparecem na $2f_1$, $3f_1$ e multiplica $nj\omega_1$ da frequência fundamental f_1 . Os harmônicos do segundo tom f_2 estão em frequências mais altas, as quais não são mostradas na Figura 17. De acordo com a norma IEC 60268-5 [31], a Distorção Harmônica de enésima ordem pode ser expressa em porcentagem

$$HD_n = \frac{|P_n|}{P_i} 100 \quad (3)$$

or in decibel

ou em dB

$$L_{HD,n} = 20 \lg \left(\frac{HD_n}{100} \right) \quad (4)$$

the **T**otal **H**armonic **D**istortion in percent
a Distorção Harmônica total em porcentagem

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N |P_i|^2}}{P_i} 100 \quad (5)$$

or in decibel

ou em dB

$$L_{THD} = 20 \lg \left(\frac{THD}{100} \right) \quad (6)$$

using the rms-value of the total signal
usando os valores em rms do sinal total

$$P_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad (7)$$

The common presentation methods for harmonic distortion measurement results have some disadvantages:

Os métodos de apresentação mais comuns para os resultados das medições da distorção harmônica tem algumas desvantagens:

The measures HD_n , THD in Eqs. (3) and (5), respectively, refer the amplitude of the measured distortion components to the rms-value P_t of the total signal $p(t)$. In this way the measured distortion responses depend on the fundamental which is mainly determined by the linear transfer function $H(j\omega)$. This yields high values of harmonic distortion at low frequencies where the radiation of the harmonics is much better than the radiation of the fundamental. Also, break up modes, radiation, deflections of the sound wave at the enclosure edges and reflections in the room increase the complexity of the distortion curves [32].

As medidas, HD_n , THD nas Eqs. (3) e (5), respectivamente, referem-se à amplitude das componentes de distorção medidas para o valor rms de P_t do sinal total $p(t)$. Desta forma as respostas de distorção medidas dependem da fundamental, que é determinada principalmente pela função de transferência linear $H(j\omega)$. Isso produz altos valores de distorção harmônica em baixas frequências onde a radiação dos harmônicos é muito melhor do que a radiação da fundamental. Além disso, modos *break-up*, radiação, desvios da onda sonora nas bordas da caixa e reflexões no ambiente, aumentam a complexidade das curvas de distorção [32].

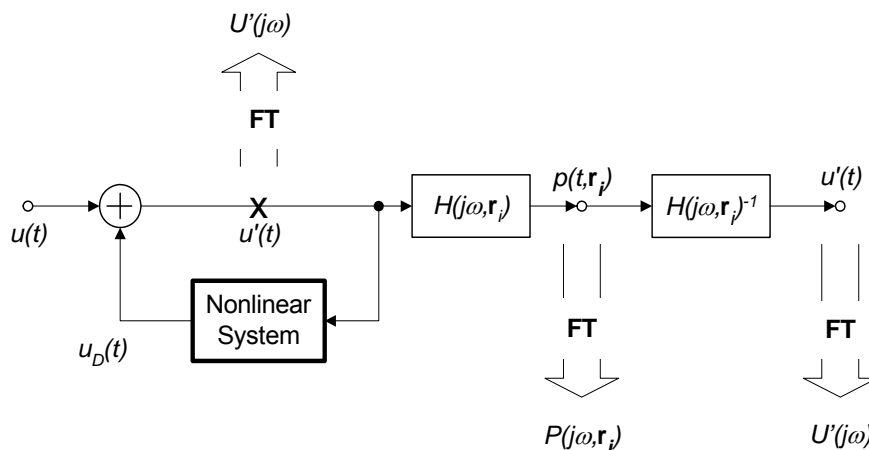


Figure 18: Measurement of equivalent input distortion by performing an inverse filtering prior to spectral analysis.

Figura 18: Medição de distorção de entrada equivalente ao realizar uma filtragem inversa antes da análise espectral.

The results of the distortion measurement are much easier to interpret if the distortion is measured closer to the source. Since most of the dominant distortion is generated in the one-dimensional signal path (motor, suspension) it can be lumped together in a signal source adding distortion $u_D(t)$ to the input signal $u(t)$ as shown in Figure 18. Unfortunately, this point is not accessible for direct measurements in real loudspeakers. However, distortion measured in sound pressure, displacement or any other state variable can easily be transformed into the input signal

by filtering with the inverse transfer function $H(j\omega)^{-1}$. This concept [33] produces less, but more meaningful data and is a convenient way for separating motor distortion from distortion generated in the multi-dimensional domain (break-up modes, radiation).

Os resultados da medição de distorção são muito mais fáceis de interpretar quando a distorção é medida mais perto da fonte. Sabendo-se que a maioria das distorções dominantes são geradas unidimensionalmente (motor, suspensão), estas podem ser concentradas em uma fonte de sinal adicionando distorção $u_D(t)$ para o sinal de entrada $u(t)$, como mostrado na Figura 18. Infelizmente, este ponto não é acessível para medições diretas em alto-falantes reais. No entanto, a medição da distorção da pressão sonora, do deslocamento ou de qualquer outra variável de estado podem ser facilmente transformados em sinais de entrada através da filtragem com a função de transferência inversa $H(j\omega)^{-1}$. Este conceito [33] produz menos dados, porém mais significativos, além de ser uma forma conveniente de separar a distorção do motor da distorção gerada no domínio multi-dimensional (modos *break-up*, radiação).

The *n*th-order **E**quivalent **H**armonic **I**nput **D**istortion in percent is defined

A Distorção Harmônica Equivalente de Entrada de enésima ordem é definida em porcentagem

$$EHD_n = \frac{|U_n|}{U_t} 100, \quad \text{for } n > 1 \quad (8)$$

or in decibel

ou em dB

$$L_{EHD,n} = 20 \lg \left(\frac{EHD_n}{100} \right), \quad \text{for } n > 1, \quad (9)$$

the **E**quivalent **T**otal **H**armonic **I**nput **D**istortion in percent

a Distorção Harmônica Equivalente de Entrada em porcentagem

$$ETHD = \frac{\sqrt{|U_2|^2 + |U_3|^2 + \dots + |U_n|^2}}{U_t} 100 \quad (10)$$

or in decibel

ou em dB

$$L_{ETHD} = 20 \lg \left(\frac{ETHD}{100} \right) \quad (11)$$

using the equivalent input components

usando as components equivalentes de entrada

$$U_n(j\omega_1) = \frac{P_n(j\omega_1)}{H(nj\omega_1)}, n > 0 \quad (12)$$

and the rms value of the total input voltage signal U_t

e os valores em rms da tensão total de entrada

$$U_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 + u_D(t)^2 dt} . \quad (13)$$

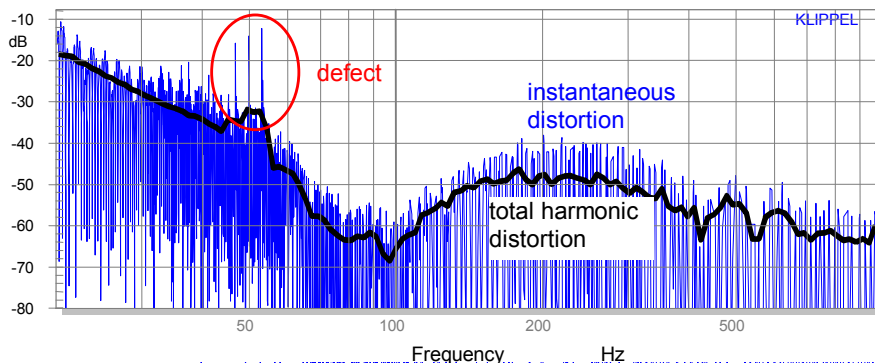


Figure 19: Instantaneous distortion IHD and total harmonic distortion THD in sound pressure output measured with a sinusoidal sweep on a defective loudspeaker.

Figura 19: Distorção instantânea IHD e distorção harmônica total THD na saída de pressão sonora, medida com uma varredura senoidal em um alto-falante com defeito.

Traditional harmonic distortion measurements only exploit the amplitude of the harmonic components. The phase of the higher-order harmonics is usually neglected because the interpretation is difficult. However, both phase and amplitude spectrums determine the waveform of the distortion in the time domain [34]. The waveform of the harmonic distortion signal can be calculated for a sinusoidal stimulus at ω by applying the inverse Fourier transform to the harmonics in the complex spectrum giving the **Instantaneous Harmonic Distortion in percent**

Medições tradicionais de distorção harmônica exploram apenas a amplitude das componentes harmônicas. A fase dos harmônicos de ordem superior é geralmente desprezado devido à sua difícil interpretação. No entanto, tanto o espectro de fase quanto o de amplitude, determinam a forma de onda da distorção no domínio do tempo [34]. A forma de onda do sinal de distorção harmônica pode ser calculado por um estímulo senoidal em ω e aplicando a Transformada inversa de *Fourier* para os harmônicos no espectro complexo, resultando assim na Distorção Harmônica instantânea em percentagem

$$IHD(t) = \frac{\left| \sum_{i=2}^N P_i e^{j i \omega t} + P_i^* e^{-j i \omega t} \right|}{p(t)} 100 \quad (14)$$

or in decibel
ou em dB

$$L_{IHD} = 20 \lg \left(\frac{IHD}{100} \right) \quad (15)$$

For a sinusoidal sweep the time t corresponds with an instantaneous frequency $\omega(t)$ giving the frequency response $L_{IHD}(f)$. For example, Figure 19 shows instantaneous harmonic distortion $L_{IHD}(f)$ as thin line and the total harmonic distortion THD as a thick line versus frequency between 20 Hz and 1 kHz. The ratio between the instantaneous distortion (IHD) and the rms-value of the distortion (THD) gives the **Instantaneous Crest factor of Harmonic Distortion**

Para uma varredura senoidal, o tempo t corresponde com uma frequência instantânea $\omega(t)$, resultando na resposta em frequência $L_{IHD}(f)$. Por exemplo, a Figura 19 mostra a distorção harmônica instantânea (IHD) com uma linha fina, e a distorção harmônica total (THD), com uma linha grossa, *versus* a frequência entre 20 Hz e 1 kHz. A relação entre a distorção instantânea (IHD) e o valor rms da distorção (THD) resulta no Fator de Crista instantâneo da Distorção Harmônica em dB

$$ICHD = 20 \lg \left(\frac{IHD}{THD} \right) \quad (16)$$

in decibel. This measure describes the transient and impulsive properties of the harmonic distortion and plays an important role in the separation of soft- or hard limiting nonlinearities and the identification of loudspeaker defects. For example, distortion caused by regular motor and suspension nonlinearities produces relatively smooth distortion curves and the $ICHD$ stays below 10 dB. A loudspeaker defect such as a wire beat generates a much higher crest factor ($ICHD > 10$ dB) as shown at 50 Hz in Figure 19.

Esta medida descreve o transiente e as propriedades impulsivas da distorção harmônica e desempenha um papel importante na separação de não-linearidades suaves ou acentuadas e na identificação de defeitos do alto-falante. Por exemplo, a distorção causada por não-linearidades do motor regular e da suspensão produzem curvas de distorção relativamente suaves e o $ICHD$ fica abaixo de 10 dB. Um defeito do alto-falante, como uma batida do fio, gera um fator de crista muito maior ($ICHD > 10$ dB), como mostrado em 50Hz na Figura 19.

4.3.3. Intermodulation Distortion Distorção de intermodulação

The IEC standard [31] summarizes the summed and difference-tone components of the same order and defines the n th-order **Inter-Modulation Distortion** ($n > 1$) in percent

A norma IEC [31] resume as componentes de tons somados e subtraídos de mesma ordem e define a n ésima ordem da Distorção de Inter-Modulation ($n > 1$) em percentagem

$$IMD_n = \frac{|P(j\omega_2 - (n-1)j\omega_1)| + |P(j\omega_2 + (n-1)j\omega_1)|}{|P(j\omega_2)|} \cdot 100 \quad (17)$$

or in decibel

ou em dB

$$L_{IMD,n} = 20 \lg \left(\frac{IMD_n}{100} \right) \quad (18)$$

Summarizing all n th-intermodulation distortion gives the **Total Inter-Modulation Distortion** in percent.

Resumindo todas as distorções de intermodulação de n ésima ordem, resulta na Distorção de Inter-Modulação Total em percentagem.

$$IMD_{Total} = \sqrt{\sum_{i=2}^N \exp_{10}(IMD_i / 10)} \cdot 100 \quad (19)$$

or in decibel

ou em dB

$$L_{IMD,total} = 20 \lg \left(\frac{IMD_{Total}}{100} \right) \quad (20)$$

In this paper two kinds of intermodulation distortion measurements are used:

Neste artigo, serão usados dois tipos de medições da distorção de intermodulação:

1. Sweeping the Bass-Tone

The first tone f_1 is varied from $f_s/2$ to $2f_s$ and the second tone is set at the constant frequency $f_2=10f_s$.

1. Varredura de tons graves

O primeiro tom f_1 varia de $f_s/2$ a $2f_s$ e o segundo tom é ajustado em uma frequência constante $f_2=10f_s$

2. Sweeping the **Voice-Tone**

The first tone is set at a constant frequency $f_1=f_s/5$ and the second tone f_2 is varied from $7f_s$ to $20f_s$.

2. Varredura de tons de voz

O primeiro tom é fixado em uma frequência constante $f_1=f_s/5$ e o segundo tom f_2 é variado entre $7f_s$ e $20f_s$.

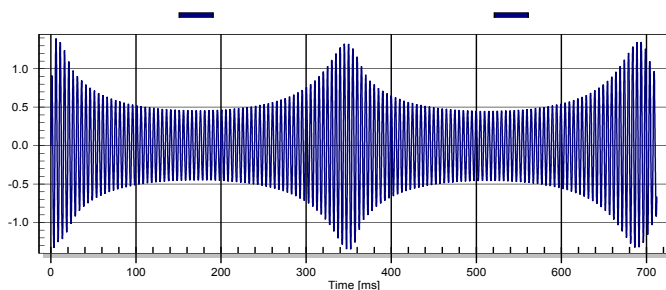


Figure 20: Amplitude modulation of a high-frequency tone by a low frequency tone caused by a nonlinear force factor $Bl(x)$

Figura 20: Modulação em amplitude de um tom de alta frequência por um tom de baixa frequência causada por um fator de força não-linear $Bl(x)$

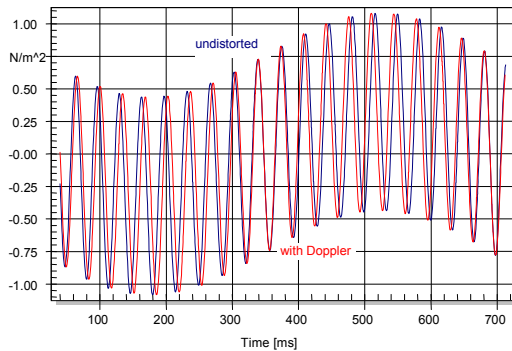


Figure 21: Phase modulation of a high-frequency tone by a low frequency tone caused by the Doppler Effect

Figura 21: Modulação de fase de um tom de alta frequência por um tom de baixa frequência causada pelo Efeito Doppler

4.3.4. Separation of *FM* and *AM* Distortion *De separação da distorção FM e AM*

The IEC standard 60268-5 [31] and other traditional intermodulation measurements exploit the amplitude of the tones in the sidebands only. The phase of the components gives further information to identify the modulation mechanism:

A norma IEC 60268-5 [31] e outras medidas tradicionais de intermodulação exploram a amplitude dos tons apenas dentro das bandas laterais. A fase das componentes fornecem mais informações para a identificação do mecanismo de modulação:

The **Amplitude Modulation (AM)** causes a variation of the envelope of the first tone (carrier) according to the modulating second tone but does not affect the phase of the carrier [35]. The parametric excitation due to the $Bl(x)$ is a typical example for amplitude modulation. Figure 20 shows one period of the low frequency tone modulating the envelope of the radiated high-frequency tone.

A modulação em amplitude (AM) provoca uma variação do envelope do primeiro tom (portadora) de acordo com o segundo tom de modulação, mas não afeta a fase da portadora [35]. A excitação paramétrica devido a $Bl(x)$ é um exemplo típico de modulação em amplitude. A Figura 20 mostra um período do tom de baixa frequência modulando o envelope do tom de alta frequência radiada.

The **Frequency Modulation (FM)** does not change the envelope of the signals but changes the phase of the high frequency tone. For example, Figure 21 shows the waveforms of a radiated two-tone signal with and without Doppler effect over one period of the low frequency tone. The phase of the high frequency tone changes with the amplitude of the low frequency tone.

A modulação em frequência (FM) não altera o envelope dos sinais, mas altera a fase do tom de alta frequência. Por exemplo, a Figura 21 mostra as formas de onda de uma radiação de um sinal

de dois tons, com e sem Efeito Doppler, ao longo de um período do tom de frequência baixa. A fase do tom de alta frequência altera-se com a amplitude do tom de baixa frequência.

The intermodulation generated by an *AM*-process can be described by the **Amplitude Modulation Distortion** expressed in percent

A intermodulação gerada por um processo de *AM* pode ser descrita pela Distorção da Modulação em Amplitude expressa em percentagem

$$AMD = \frac{\sqrt{\frac{2}{K} \sum_{k=1}^K (E[k] - \bar{E})^2}}{\bar{E}} * 100 \quad (21)$$

or in decibel

ou em dB

$$L_{AMD} = 20 \lg \left(\frac{AMD}{100} \right) \quad (22)$$

by using the instantaneous envelope $E[k]$ and the averaged envelope

usando o envelope instantâneo $E[k]$ e o envelope médio

$$\bar{E} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K E[k] \quad (23)$$

of the modulated high-frequency tone which can be calculated from complex spectrum by using the analytical signal [36].

do tom de alta frequência modulado, que pode ser calculado por um espectro complexo, usando um sinal analítico [36].

The measures AMD and L_{AMD} show the contribution of amplitude modulation and can be compared with the total intermodulation measures IMD_{Total} and $L_{IMD,total}$ which consider both *FM* and *AM* distortion.

As medidas AMD e L_{AMD} mostram a contribuição da modulação em amplitude e podem ser comparadas com a medida de intermodulação total IMD_{Total} e $L_{IMD,total}$, que consideram tanto a distorção *FM* como a *AM*.

4.4. Dc-Displacement Deslocamento DC

If some of the nonlinearities have an asymmetrical shape a rectification process takes place and a dc-component X_{dc} is generated in the voice coil displacement [37]. A dc-part can not be generated in velocity, acceleration or the corresponding sound pressure output because those time signals are derivatives of the displacement. The voice coil current is also free of a dc-component because the magnetic flux is differentiated and the back-EMF is the product of two orthogonal time signals (displacement and velocity).

Quando alguma das não-linearidades tiver uma forma assimétrica, entrará no lugar um processo de retificação, e uma componente DC, X_{dc} , será gerada no deslocamento da bobina móvel [37]. A parte DC não pode ser gerada na velocidade, na aceleração ou na saída da pressão sonora correspondente, já que os sinais do tempo são derivados do deslocamento. A corrente da bobina móvel é também livre de uma componente DC, pois o fluxo magnético é diferenciado e a força contra eletro-motriz é o produto de dois sinais de tempo ortogonais (deslocamento e velocidade).

5. EFFECTS OF THE CURVE SHAPE EFEITOS DA FORMA DE CURVA

There are some general relationships between the shape of nonlinearity and the magnitude of the low- and high-order distortion components independent of the physical context and the location of the nonlinearity in the differential equation.

The following discussion uses the $K_{ms}(x)$ and $Bl(x)$ -nonlinearities as examples.

Existem algumas relações entre a forma de não-linearidade e a magnitude das componentes de distorção de baixa e de alta ordem, independente do contexto físico e da localização da não-linearidade na equação diferencial.

A discussão a seguir usa as não-linearidades $K_{ms}(x)$ e $Bl(x)$ como exemplos

5.1. Symmetry and asymmetry Simetria e Assimetria

The most obvious feature of a nonlinear parameter is the symmetry of the curve. A well-made loudspeaker should have symmetric $K_{ms}(x)$ and $Bl(x)$ curves. At high positive and negative excursion the suspension will be limited by unfolded and stretched suspension material and the voice coil will leave the gap. A symmetric curve usually produces 3rd- and other odd-order distortion components as illustrated in Table 2. No dc-displacement or other even-order distortion components are generated as long as the nonlinear system is stable. A loudspeaker may become unstable if a motor with an equal-length coil-gap configuration is combined with a soft suspension [30].

A característica mais evidente de um parâmetro não-linear é a simetria da curva. Um bom alto-falante deve ter as curvas $K_{ms}(x)$ e $Bl(x)$ simétricas. Em alta excursão positiva e negativa, a suspensão será limitada por material desdobrado e estendido e a bobina móvel deixará o *gap*. A curva simétrica geralmente produz componentes de distorção de 3^a ordem e outras de ordem

ímpar, como ilustrado na Tabela 2. Nenhum deslocamento DC ou componentes de distorção de mesma ordem serão gerados enquanto o sistema não-linear for estável. Um alto-falante pode tornar-se instável caso um motor com uma configuração bobina-gap de mesmo comprimento seja combinado com uma suspensão suave [30].

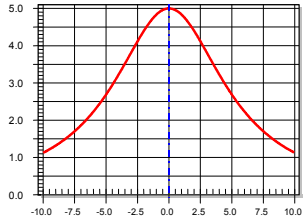
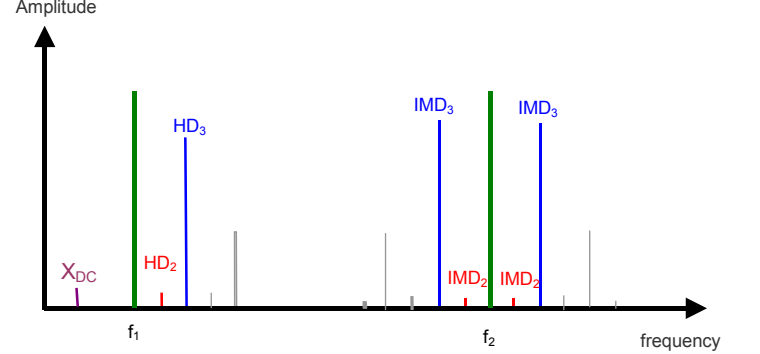
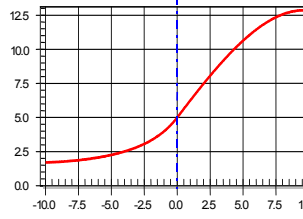
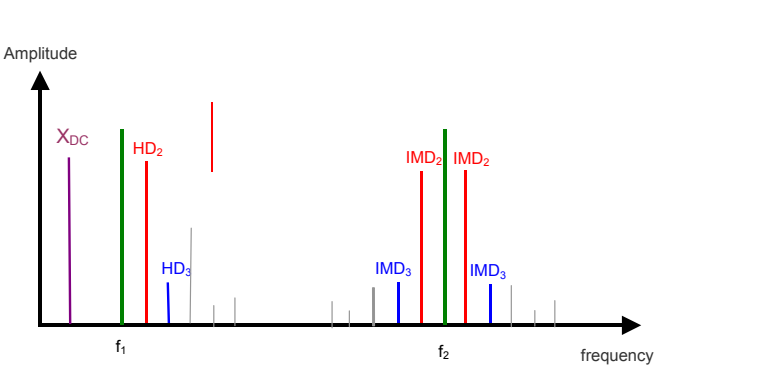
 <p>Symmetrical Nonlinearity Não-linearidade simétrica</p>	 <p>Symmetrical nonlinearity generates high 3rd-order distortion (HD_3, IMD_3) Não-linearidade simétrica gera distorção de terceira ordem (HD_3, IMD_3)</p>
 <p>Asymmetrical Nonlinearity Não-linearidade assimétrica</p>	 <p>Asymmetrical nonlinearity generates high 2nd-order distortion (IMD_2, HD_2) Não-linearidade assimétrica gera distorção de segunda ordem (IMD_2, HD_2)</p>

Table 2 Relationship between shape of nonlinearities and the generated odd- and even-order distortion components

Tabela 2 Relação entre a forma de não-linearidades e as componentes de distorção de ordem ímpar e par geradas

Other nonlinearities, such as the inductance of a driver without shorting ring, the Doppler effect and wave steepening, have a distinct asymmetry that is difficult (inductance) or impossible

(wave steepening) to eliminate. Asymmetric nonlinearities generate primarily even-order distortion. However, since these nonlinearities are usually part of a feedback loop (a characteristic of systems that can be described with a nonlinear differential equation) odd-order distortion components are also generated by multiplying the even-order distortion with the fundamental component.

Outras não-linearidades, tais como a indutância de um *driver* sem anel de curto, o Efeito Doppler e as ondas de maior inclinação, tem uma assimetria distinta que pode ser difícil (indutância) ou impossível (onda maior inclinação) de eliminar. Não-linearidades assimétricas geram principalmente distorção de ordem par. No entanto, uma vez que estas não-linearidades são geralmente parte de um ciclo de *feedback* (uma característica de sistemas que pode ser descrito com uma equação diferencial não-linear), componentes de distorção de ordem ímpar também são geradas pela multiplicação da distorção de ordem par com a componente fundamental.

5.2. Soft- and hard-limiting nonlinearities Não-linearidades suaves e acentuadas

Another obvious feature of the nonlinear curve shape is the steepness of the curve. Motors where coil and gap have the same length become nonlinear at relatively small displacement as shown as dashed line in Figure 5. Conversely, a large voice coil overhang causes a plateau where the force factor is almost constant over a certain range as shown as solid line in Figure 5. However, when the coil leaves the gap the force factor decays at a much higher rate than the equal-length configuration. For high displacement of half the coil height ($x = \pm 5$ mm) both configurations give the same force factor value ($Bl = 2.5$ N/A) neglecting the influence of the fringe field. If both curves are expanded into a power series the coefficient of the quadratic term is dominant for the equal-length configuration but the overhang coil will result in a dominant higher-order coefficient.

Outra característica conhecida da forma da curva não-linear é a sua inclinação. Motores, onde a bobina e o *gap* têm o mesmo comprimento tornam-se não-lineares em deslocamento relativamente pequeno, conforme mostrado como linha tracejada na Figura 5. Por outro lado, uma bobina móvel *overhang* grande causa uma acentuação da curva, onde o fator força é quase constante ao longo de um determinado intervalo, como mostrado como linha sólida na Figura 5. No entanto, quando a bobina deixa o *gap*, o fator de força decai a uma taxa muito maior do que a configuração de mesmo comprimento. Para o alto deslocamento de metade da altura da bobina ($x = \pm 5$ mm), ambas configurações geram o mesmo valor do fator força ($Bl = 2.5$ N/A), desprezando-se a influência do campo ao redor. Se ambas curvas forem expandidas em uma série de potência, o coeficiente do termo quadrático será dominante para a configuração de mesmo comprimento, porém a bobina *overhang* resultará em um coeficiente dominante de ordem maior.

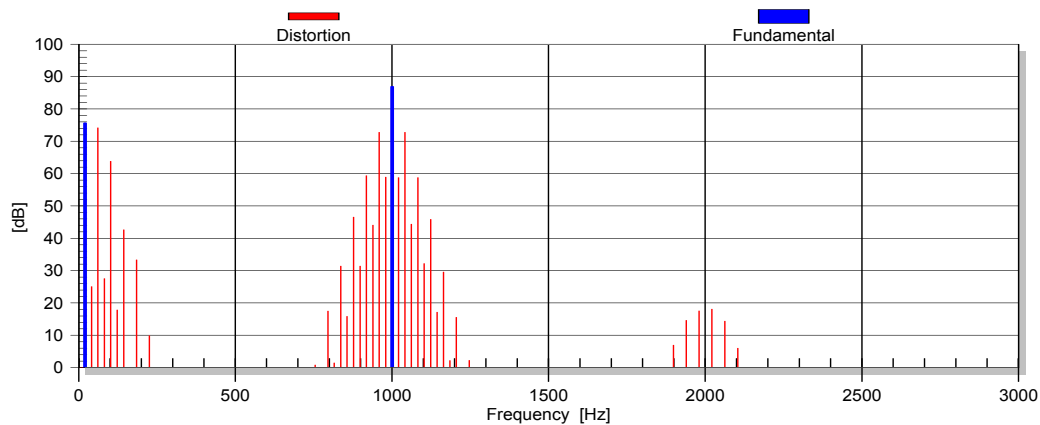


Figure 22: Spectrum of distorted two-tone stimulus in sound pressure output generated by a force factor $Bl(x)$ of an equal-length coil configuration

Figura 22: Espectro de estímulo de dois tons distorcido na saída de pressão sonora, gerada por um fator de força $Bl(x)$ de uma configuração de bobina de mesmo comprimento

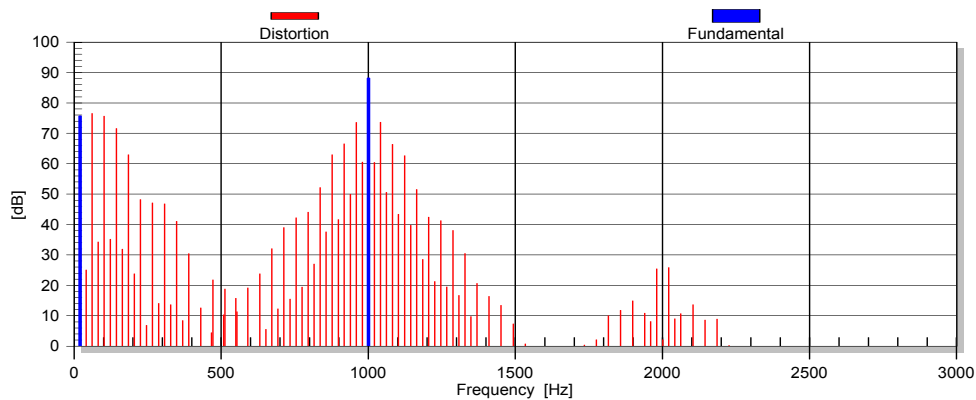


Figure 23: Spectrum of distorted two-tone stimulus in sound pressure output generated by a force factor $Bl(x)$ of an overhang coil-gap configuration

Figura 23: Espectro de estímulo de dois tons distorcidos na saída de pressão sonora devido a um fator de força $Bl(x)$ de uma configuração de bobina *overhang-gap*

The steepness of the nonlinear curve directly corresponds with the energy of the higher-order components.

A inclinação da curva não-linear corresponde diretamente com a energia das componentes de ordem superior.

Figure 22 shows the spectrum of the distorted two-tone signal caused by the force factor nonlinearity of the equal-length configuration. Clearly the third-order distortion is maximal and

the fifth- and higher-order components rapidly decay. Nonlinearity with a more distinct onset like the $Bl(x)$ of an overhang coil produces larger higher-harmonics as shown in Figure 23.

A Figura 22 mostra o espectro do sinal de dois tons distorcidos devido à não-linearidade do fator força da configuração de mesmo comprimento. Claramente a distorção de terceira ordem é máxima, enquanto que as componentes de quinta e de ordem superiores decaem rapidamente. A não-linearidade com um início mais distinto como o $Bl(x)$ de uma bobina *overhang*, produz altos harmônicos, como mostrado na Figura 23.

While these spectra are measured at a particular voice coil displacement ($x_{peak}=5\text{mm}$) it is also interesting to investigate the dependency of the spectrum characteristics on the displacement (which stands for the amplitude of the excitation).

Embora estes espectros sejam medidos em um deslocamento particular da bobina móvel ($x_{peak}=5\text{mm}$) também é interessante analisar a dependência das características do espectro no deslocamento (que representa a amplitude da excitação).

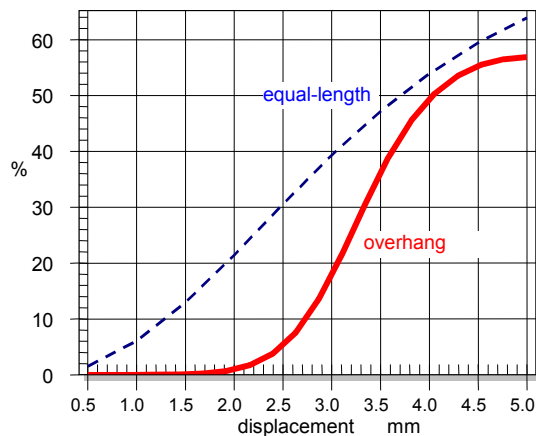


Figure 24: Total harmonic distortion (THD) in percent versus voice coil displacement for a motor with an overhang coil (thick line) and with an equal-length configuration (dashed line).

Figura 24: Distorção harmônica total (THD) em percentual *versus* o deslocamento da bobina móvel de um motor com uma bobina presa (linha em negrito) e com uma configuração de mesmo comprimento (linha tracejada).

Figure 24 shows total harmonic distortion (THD) for both configurations simulated at the resonance frequency versus voice coil displacement x . Since the equal-length configuration causes an early $Bl(x)$ decay, the distortion rises almost linearly with displacement. The equal-length configuration produces 30 % THD at $x_{peak}=2.5$ mm but the distortion of the overhang coil is about 5 %. At higher displacements the distortion of the overhang coil rises at a much higher rate to almost the same value as the equal-length configuration.

A Figura 24 mostra a distorção harmônica total (THD) para ambas as configurações simuladas na frequência de ressonância *versus* o deslocamento x da bobina móvel. Como a configuração de mesmo comprimento causa uma antecipação da queda de $Bl(x)$, a distorção sobe quase linearmente com o deslocamento. A configuração de mesmo comprimento produz 30% de THD no $x_{peak}=2.5$ mm, mas a distorção da bobina *overhang* é de cerca de 5%. Em maiores deslocamentos, a distorção da bobina *overhang* aumenta a uma taxa muito mais elevada para quase o mesmo valor da configuração de mesmo comprimento.

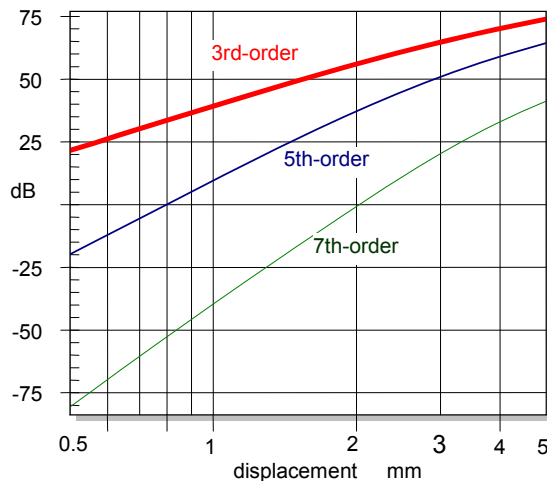


Figure 25: Amplitude of 3rd, 5th and 7th-order harmonic distortion components in sound pressure versus displacement for an equal-length configuration

Figura 25: Amplitude de 3^a, 5^a e 7^a ordem das componentes de distorção harmônica na pressão sonora *versus* o deslocamento para uma configuração de mesmo comprimento

It is also interesting to investigate the dependency of each distortion component versus displacement. Figure 25 shows the 3rd-, 5th- and 7th-order distortion generated by the equal-length configuration versus displacement on a double logarithmic scale. Below 2 mm all the curves are almost perfectly straight lines whose gradient rises with the order of the distortion. This is typical for a weakly nonlinear system with a smooth curve shape (soft nonlinearity). The third-order distortion is below 5 % and the higher-order distortion components are practically negligible. The large signal domain starts at 3 mm where the amplitude compression starts and all of the distortion curves rise at a smaller rate. Due to the feedback loop in the nonlinear differential equation the distortion components reduce the fundamental and disturb their own generation process. Even at 5 mm displacement the 7th-order distortion is 25 dB below the 3rd-order component.

Também é interessante analisar a dependência de cada componente de distorção *versus* o deslocamento. A Figura 25 mostra a distorção de 3^a, 5^a e 7^a ordem, gerada pela configuração de mesmo comprimento *versus* o deslocamento em uma escala logarítmica dupla. 2 milímetros abaixo todas as curvas são linhas quase perfeitamente retas, cuja inclinação se eleva com a ordem da distorção. Isto é típico para um sistema levemente não-linear com uma forma de curva

suave (não-linearidade suave). A distorção de terceira ordem é inferior a 5% e as componentes de distorção de ordens mais elevadas são praticamente desprezíveis. O domínio de sinal de grande amplitude começa a 3 mm, quando a amplitude de compressão começa e todas as curvas de distorção crescem a uma taxa menor. Devido ao ciclo de *feedback* na equação diferencial não-linear, as componentes de distorção reduzem a fundamental e perturbam o seu processo de geração própria. Mesmo a 5 mm de deslocamento, a distorção de 7ª ordem está 25 dB abaixo da componente de 3ª ordem.

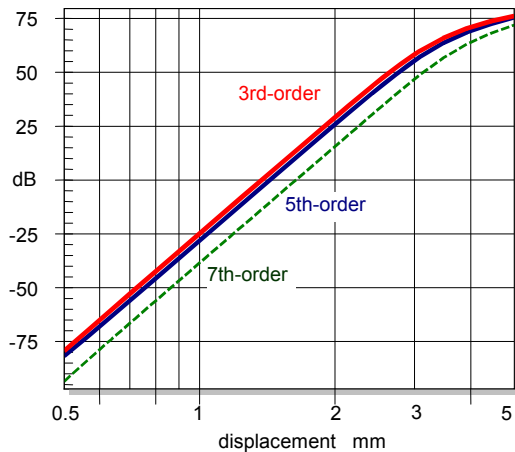


Figure 26: Amplitude of 3rd, 5th and 7th-order distortion components in sound pressure versus displacement for an overhang coil

Figura 26: Amplitude de 3ª, 5ª e 7ª ordem das componentes de distorção na pressão sonora *versus* o deslocamento de uma bobina *overhang*.

Figure 26 reveals a completely different behavior of the overhang coil. This behavior is characteristic of a hard-limiting nonlinearity. In the small signal domain all of the curves are also straight lines but now rise at the same rate. Furthermore, low and higher-order components contribute almost the same distortion level. At $x_{peak}=3$ mm the onset of amplitude compression indicates the large signal domain. Also here the distortion components stay at about the same order of magnitude.

A Figura 26 revela um comportamento completamente diferente da bobina *overhang*. Este comportamento é característico de uma não-linearidade altamente acentuada. No domínio de sinais pequenos, todas as curvas são linhas retas, mas agora também sobem na mesma proporção. Além disso, as componentes de ordem inferiores e superiores contribuem quase no mesmo nível de distorção. Em $x_{peak}=3$ mm, o início da compressão em amplitude indica o domínio do sinal de grande amplitude. Neste caso as componentes de distorção também apresentam-se na mesma ordem de magnitude.

These simulations show pros and cons of the two configurations: The overhang coil clearly gives much less distortion at low and medium amplitude (below the onset point of the hard limiting nonlinearity) while the equal-length configuration (representing a soft limiting nonlinearity)

produces low-order distortion at low amplitudes. Operating the loudspeaker in the full large signal range where the coil is half out of the gap, the overhang coil produces higher-order harmonics of larger amplitude than the equal-length coil. Since the higher-order components are located at larger distance from the fundamental components they are less masked by our auditory system and will more likely degrade the subjectively perceived sound quality.

Estas simulações mostram prós e contras das duas configurações: A bobina *overhang* gera claramente muito menos distorção de baixa e média amplitude (abaixo do ponto de início da não-linearidade altamente acentuada), enquanto a configuração de igual comprimento (o que representa uma não-linearidade suave) produz distorção de ordem inferior em baixas amplitudes. Operando o alto-falante em seu máximo alcance, onde metade da bobina encontra-se fora do *gap*, a bobina *overhang* produz harmônicos de ordem superior em maior amplitude do que a bobina de igual comprimento. Se as componentes de ordem superior estiverem localizadas em locais mais distantes das componentes fundamentais, serão menos mascaradas pelo nosso sistema auditivo e muito provavelmente degradará a qualidade do som percebida subjetivamente.

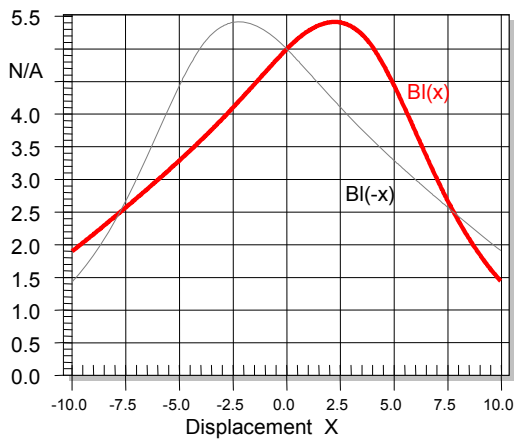


Figure 27: Twisted force factor characteristic
 Figura 27: Característica do fator força torcido

5.3. Twisted Curves Curvas torcidas

A third graphical feature of the curve shape is the gradual change of the asymmetry causing a twisted curve shape. For example Figure 27 shows a BI -curve which has a distinct maximum at $x=2.5$ mm. However, the force factor decays at a much higher rate for positive displacement than on the left slope towards negative displacement. Thus, the force factor is lower at a positive displacement of $+10$ mm than for -10 mm. Such a twisted curve shape has a characteristic effect on the distortion as shown in

Figure 28.

Uma terceira característica gráfica da forma da curva é a mudança gradual da assimetria, causando uma forma de curva torcida. Por exemplo, a Figura 27 mostra uma curva BI que tem

um máximo distinto em $x = 2,5$ mm. No entanto, o fator força decai a uma taxa muito mais elevada para o deslocamento positivo do que na encosta à esquerda no sentido de deslocamento negativo. Assim, o fator força é inferior para um deslocamento positivo de 10 mm do que para -10 mm. Assim, uma forma de curva torcida tem um efeito característico na distorção, como mostra a Figura 28.

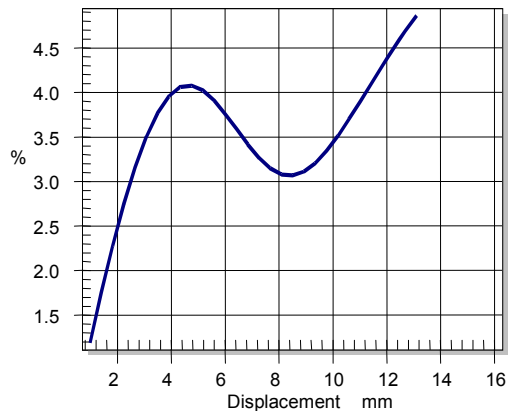


Figure 28: 2nd-order harmonic distortion versus displacement of a motor with asymmetric force factor characteristic as shown in Figure 27.

Figura 28: 2^a ordem da distorção harmônica *versus* o deslocamento de um motor com força fator assimétrico, como mostrado na Figura 27.

At small displacements ($x < 4$ mm peak) the 2nd-order distortion rises with the displacement as expected. The distortion falls for medium amplitudes ($4 \text{ mm} < x < 8$ mm peak) and rises again at high amplitudes. Thus, if the direction of the asymmetry varies with displacement some effects can be compensated for. This example also shows that a distortion measurements at one amplitude level can not give a comprehensive description of the large signal behavior.

Em pequenos deslocamentos ($x < 4$ mm no pico), a distorção de 2^a ordem aumenta com o deslocamento como esperado. A distorção diminui em amplitudes médias ($4 \text{ mm} < x < 8$ mm no pico) e sobe novamente em grandes amplitudes. Assim, se a direção da assimetria varia com o deslocamento, alguns efeitos podem ser compensados. Este exemplo mostra também que uma medida de distorção em um certo nível de amplitude não pode dar uma descrição detalhada do comportamento de grandes sinais.

6. SYMPTOMS OF LOUDSPEAKER NONLINEARITIES SINTOMAS DAS NÃO-LINEARIDADES DO ALTO-FALANTE

After discussing the effect of the nonlinear curve shape in general, the physical particularities of the dominant loudspeaker nonlinearities shall be investigated in greater detail. In this section characteristic symptoms for each nonlinearity will be shown. Table 3 anticipates the result of the following discussion. The cross-symbol (X) shows measurements which provide meaningful

symptoms for the particular nonlinearity. The star (*) marks unique symptoms which are sufficient to identify the cause of the distortion.

<p>Depois de discutir o efeito da forma da curva não-linear, em geral, as particularidades físicas das não-linearidades dominantes do alto-falante devem ser analisadas mais detalhadamente. Nesta seção, serão mostrados sintomas característicos para cada não-linearidade. A Tabela 3 antecipa o resultado da discussão a seguir. O símbolo X mostra as medições que fornecem sintomas significativos para a não-linearidade particular e a estrela (*) marca sintomas únicos que são suficientes para identificar a causa da distorção. Nonlinearities Não-linearidades</p>	<p>SYMPTOMS GENERATED IN MONITORED STATE VARIABLE SINTOMAS GERADOS EM VARIÁVEIS DE ESTADOS MONITORADAS</p>							
	Sound Pressure Pressão sonora				Current Corrente			Displacement Deslocamento
	<i>HD</i>	<i>IMD</i> (bass sweep)	<i>IMD</i> (voice sweep)	<i>AMD</i> (voice sweep)	<i>HD</i>	<i>IMD</i> (bass sweep)	<i>IMD</i> (voice sweep)	X_{dc}
$K_{ms}(x)$ suspension (spider +surround) suspensão (aranha+borda)	X						X*	
$Bl(x)$ electro-dynamical motor motor eletro-dinâmico	X	X	X	X			X*	
$L_e(x)$ position of coil in the gap posição da bobina móvel no <i>gap</i>		X	X	X		X*	X	
$L_e(i)$ “flux modulation” “modulação de fluxo”	X	X	X	X	X*	X*	X	
Geometry	X	X	X	X				

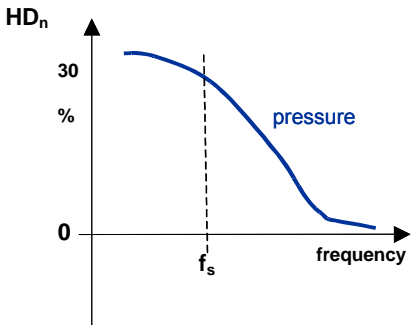
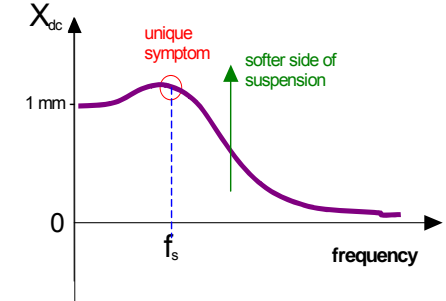
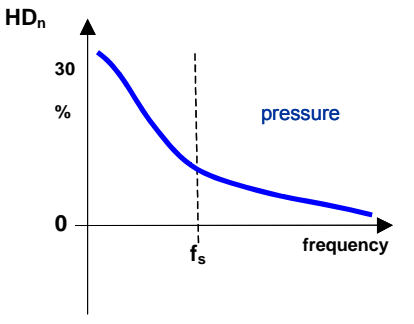
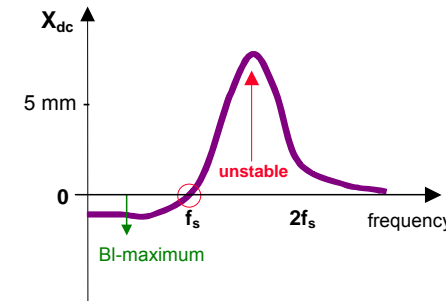
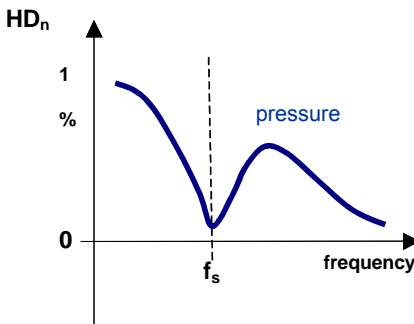
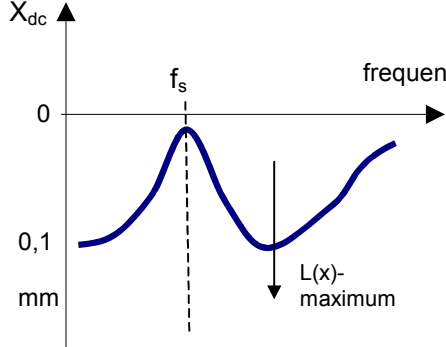
of Cone and suspension Geometria do cone e suspensão								
Young's-modulus $E(\varepsilon)$ of cone and suspension Módulo de Young $E(\varepsilon)$ do cone e suspensão	X	X	X	X				
Flow resistance $R_A(v)$ in ports of vented enclosures Resistência de fluxo $R_A(v)$ nos dutos dos gabinetes ventilados	X							
Doppler Effect radiation of sound waves Efeito Doppler Radiação da onda sonora		X	X					
Wave Steepening sound propagation at high SPL Propagação da onda de maior inclinação em alto SPL	X		X					

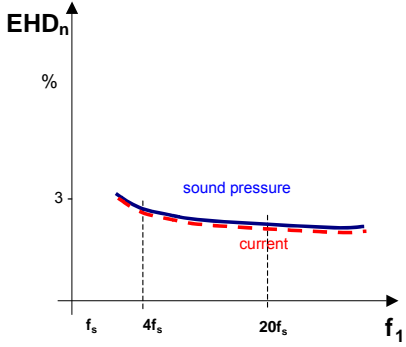
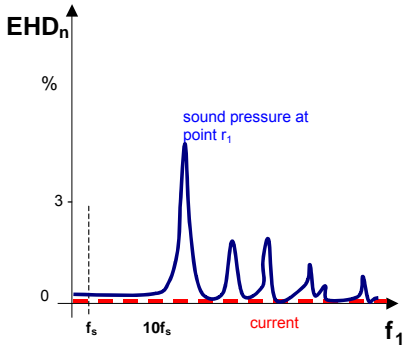
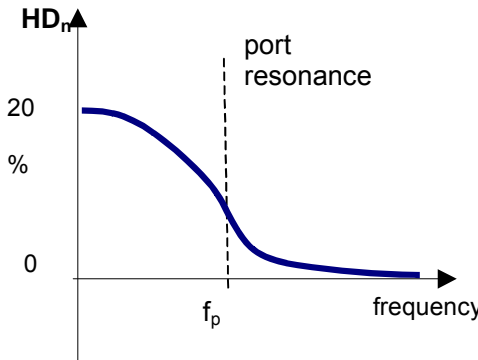
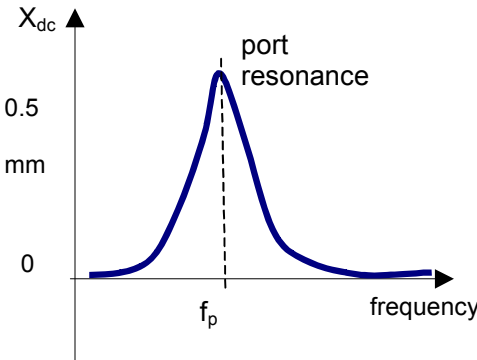
* provides unique symptoms which are sufficient for the identification of the nonlinearity.

* fornece sintomas únicos que são suficientes para a identificação da não-linearidade.

Table 3 Characteristic symptoms such as harmonic distortion (HD), intermodulation distortion (IMD), amplitude modulation distortion (AMD), dc-displacement (X_{dc}) of the dominant loudspeaker nonlinearities (unique symptoms are represented by ☼)

Tabela 3 Sintomas característicos como, distorção harmônica (HD), distorção de intermodulação (IMD), distorção de modulação em amplitude (AMD) e deslocamento DC (X_{dc}) das não-linearidades dominantes do alto-falante (sintomas únicos são representados por ☼)

Nonlinearit y Não- linearidade	Harmonic Distortion Distorção harmônica	DC Displacement Deslocamento DC
$K_{ms}(x)$		
$BI(x)$		
$L_e(x)$		

<p>$L_e(i)$</p>		<p>not generated</p> <p>não gerado</p>
<p>Variation of Geometry or Young's modulus $E(\varepsilon)$ Variação da geometria ou do Módulo de Young $E(\varepsilon)$</p>		<p>not generated</p> <p>não gerado</p>
<p>Flow resistance $R_A(v)$ in ports Resistência de fluxo $R_A(v)$ nos dutos</p>		
<p>Doppler Effect Efeito Doppler</p>	<p>Negligible</p> <p>desprezível</p>	<p>not generated</p> <p>não gerado</p>

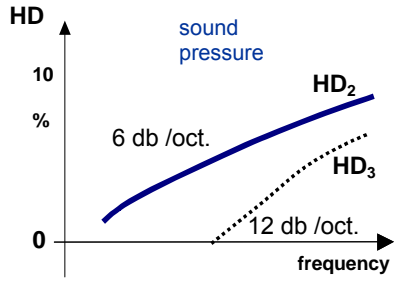
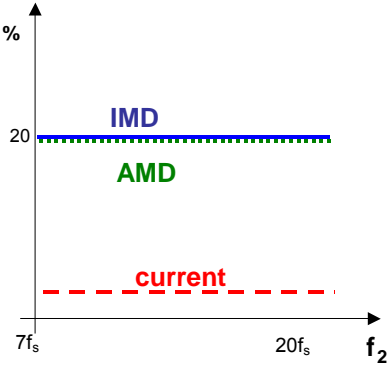
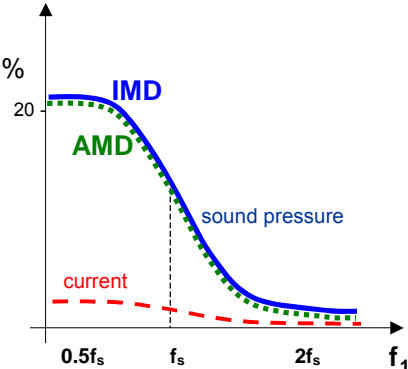
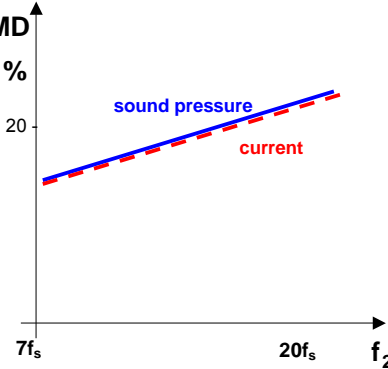
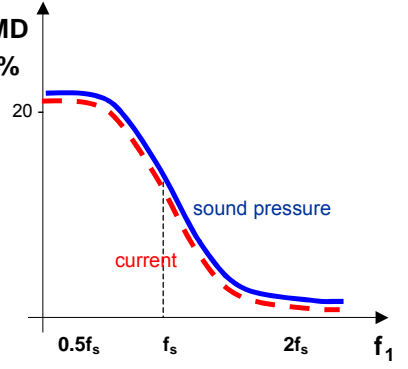
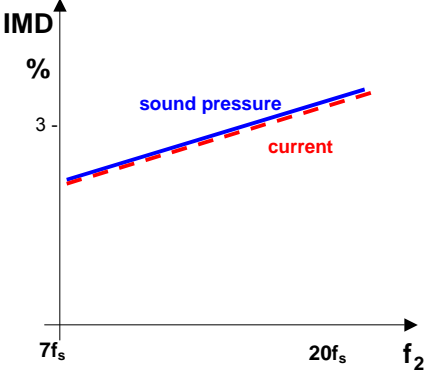
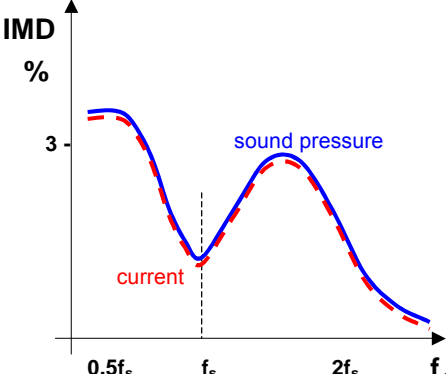
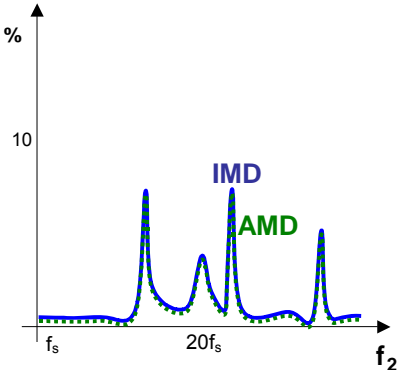
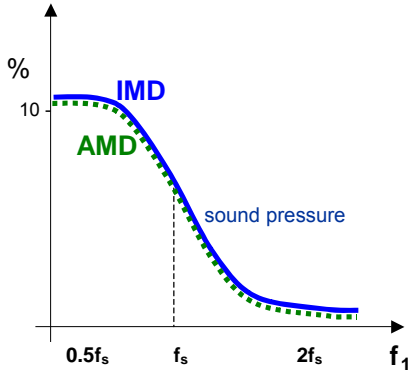
<p>Wave Steepening sound propagation at high SPL Propagação da onda de maior inclinação em alto SPL</p>		<p>not generated não gerado</p>
---	---	--

Table 4: Characteristic frequency response of harmonic distortion and dc-displacement.

Tabela 4: Resposta da frequência característica da distorção harmônica e do deslocamento DC.

Nonlinearity não-linearidade	Intermodulation Intermodulação (Voice Tone Sweep)	Intermodulation Intermodulação (Bass Tone Sweep)
$K_{ms}(x)$	Negligible desprezível	Negligible desprezível
$BI(x)$		
$L_e(x)$		

<p>$L_e(i)$</p>		
<p>Variation of Geometry and Young's-modulus $E(\varepsilon)$ Variação da geometria ou do Módulo de Young $E(\varepsilon)$</p>		
<p>Flow resistance $R_A(v)$ in ports Resistência de fluxo $R_A(v)$ nos dutos</p>	<p>Negligible desprezível</p>	<p>Negligible desprezível</p>

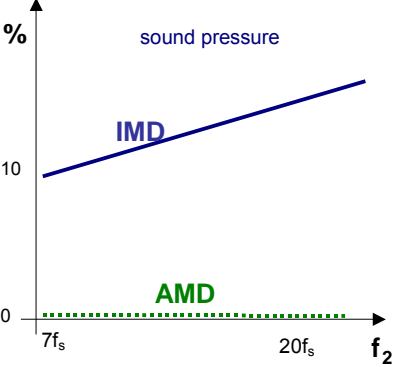
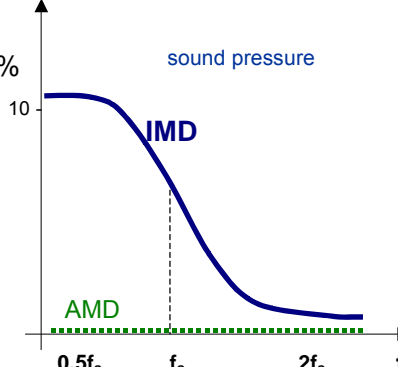
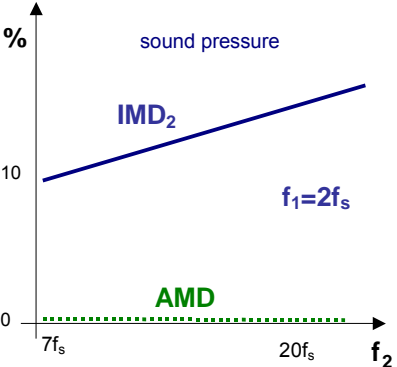
<p>Doppler Effect Efeito Doppler</p>		
<p>Wave Steepening sound propagation at high SPL Propagação da onda de maior inclinação em alto SPL</p>		<p>not applicable não aplicável</p>

Table 5: Characteristic frequency response of intermodulation distortion.

Tabela 5: Resposta de frequência característica de distorção de intermodulação.

6.1. Symptoms of $K_{ms}(x)$

Table 1 shows that the restoring force $F=K_{ms}(x)x$ of the suspension is a function of the displacement x only. Since displacement is a low-pass filtered signal, the multiplication of x with x will produce distortion components (both harmonic and intermodulation) which are restricted to low frequencies (for a soft limiting suspension below $5f_s$). A stimulus comprising a low and high frequency tone will not produce significant intermodulation components because the displacement of the high frequency tone is too small. Harmonic distortion measurements provide a sensitive but not unique symptom of the $K_{ms}(x)$ -nonlinearity as illustrated in Table 3.

A Tabela 1 mostra que a força restauradora $F=K_{ms}(x)x$ da suspensão está em função apenas do deslocamento x . Uma vez que o deslocamento é um sinal de passa-baixas filtrado, essa multiplicação produzirá componentes de distorção (harmônica e de intermodulação), que são

restritas para baixas frequências (para uma suspensão suave abaixo de $5f_s$). Um estímulo que compreende um tom de alta e baixa frequência não produzirá componentes de intermodulação significantes, pois o deslocamento do tom de alta frequência é muito pequeno. Medições de distorção harmônica fornecem um sintoma sensível, mas não exclusivo da não-linearidade de $K_{ms}(x)$, conforme ilustrado na Tabela 3.

If the $K_{ms}(x)$ -curve is asymmetric, the generated dc displacement X_{dc} is a characteristic symptom. Low frequencies which contribute to the ac-displacement contribute to the dc-component as shown in Table 4. The dc-displacement $X_{dc}(f_s)$ at the resonance frequency f_s is a unique symptom for the K_{ms} -nonlinearity. As discussed in greater detail below none of the other dominant nonlinearities can produce a significant dc-component at f_s .

Se a curva de $K_{ms}(x)$ for assimétrica, o deslocamento DC gerado X_{dc} será um sintoma característico. Baixas frequências que contribuem para o deslocamento AC contribuem com a componente DC, como mostrado na Tabela 4. O deslocamento DC, $X_{dc}(f_s)$, na frequência de ressonância f_s , é um sintoma exclusivo para a não-linearidade de K_{ms} . Como discutido mais detalhadamente abaixo, nenhuma das outras não-linearidades dominantes podem produzir uma componente DC significativa em f_s .

The sign of the dc-part is also valuable information. The dc-part always moves the coil towards the side where the suspension is softer. If the $K_{ms}(x)$ curve is not twisted the dc-part always has the same polarity and is independent of the amplitude and frequency of the stimulus.

O sinal da parte DC também é uma informação importante. A parte DC move sempre a bobina para o lado onde a suspensão é mais suave. Quando a curva de $K_{ms}(x)$ não for torcida, a parte DC terá sempre a mesma polaridade, independente da amplitude e da frequência do estímulo.

6.2. Symptoms of $Bl(x)$ Sintomas de $Bl(x)$

The $Bl(x)$ -nonlinearity causes two effects as shown in Table 1, namely the nonlinear damping and the parametric excitation. Both effects generate high harmonic distortion at low frequencies where displacement, current and velocity are high. The response is almost similar to response caused by the K_{ms} -nonlinearity. Thus the harmonic distortion measurements provide no unique symptoms to distinguish between $Bl(x)$ and $K_{ms}(x)$ nonlinearities.

A não-linearidade de $Bl(x)$ causa dois efeitos, mostrados na Tabela 1; o amortecimento não-linear e a excitação paramétrica. Ambos os efeitos geram alta distorção harmônica em baixas frequências, nas quais os deslocamentos, corrente e velocidade são altos. A resposta é quase similar à resposta causada pela não-linearidade de K_{ms} . Assim, as medidas de distorção harmônica não fornecem nenhum sintoma exclusivo para distinguir as não-linearidades de $Bl(x)$ e $K_{ms}(x)$.

However, the parametric excitation produces high intermodulation distortion in the upper audio band if the first tone provides high displacement and the second tone sufficient current. Table 5 shows a typical *IMD*- response versus frequency f_i varied at low frequencies ($0.5f_s < f_i < 2f_s$) while keeping the voice tone at $f_2=10f_s$. The *IMD* components measured in the sound pressure output are significantly higher than in the current signal. Both curves decrease with frequency because the displacement vanishes above resonance.

No entanto, a excitação paramétrica produz uma alta distorção de intermodulação na banda de áudio superior, quando o primeiro tom fornece grande deslocamento e o segundo tom, corrente suficiente. A Tabela 5 mostra uma resposta típica de *IMD versus* a frequência f_i , variada em baixas frequências ($0.5f_s < f_i < 2f_s$) e mantendo o tom de voz em $f_2=10f_s$. As componentes *IMD* medidas na saída da pressão sonora são significativamente maiores do que no sinal da corrente. Ambas as curvas diminuem com a frequência, pois o deslocamento desaparece acima da ressonância.

Table 5 shows typical *IMD* and *AMD* responses measured by using the alternative sweeping technique where the bass tone is at $f_i = 10$ Hz but the voice tone is varied in the audio band. Since $Bl(x)$ produces amplitude modulation both measures give identical values. Both values are also independent of the frequency because the fixed bass tone provides constant peak displacement.

A Tabela 5 mostra as respostas típicas *IMD* e *AMD* medidas usando a técnica de varredura alternativa, com o tom grave na $f_i = 10$ Hz, mas o tom de voz variando na banda de áudio. Como $Bl(x)$ produz modulação de amplitude, ambas as medidas apresentam valores idênticos. Ambos os valores são também independente da frequência, pois o tom grave fixo permite o deslocamento de pico constante.

The parametric excitation also generates a dc-displacement if the $Bl(x)$ -curve is asymmetrical. However, the sign of the dc-part depends on the phase of current and displacement multiplied with each other and gives the typical response shown in Table 4.

A excitação paramétrica também gera um deslocamento DC quando a curva $Bl(x)$ for assimétrica. No entanto, o sinal da parte DC depende da fase da corrente e do deslocamento multiplicados entre si, gerando a resposta típica mostrada na Tabela 4.

A single tone below resonance also generates a relatively small dc-part which moves the coil towards the Bl -maximum. This behavior may partly compensate for an offset in the coil's rest position. The dc-part vanishes at the resonance where current and displacement become 90 degree out of phase. At higher frequencies the self-centering behavior reverses and the coil has the tendency to slide down on either slope of the $Bl(x)$ -curve. Even in a perfectly symmetrical $Bl(x)$ curve a small disturbance may initiate this coil-jump-out process. This shows that the electro-dynamic transducer is potentially unstable. The dc-force generated by the motor interacts with the stiffness of the suspension at dc. Unfortunately some suspension materials have a significantly lower stiffness at dc than at resonance frequency f_s [24]. Consequently the visco-

elastic properties of the suspension material are important for the stability of the motor structure. The zero point of the dc-part ($X_{dc}=0$) at f_s is usually a unique symptom of the $Bl(x)$ -nonlinearity. A zero point can only be produced by other nonlinearities ($L_e(x)$ and $K_{ms}(x)$) if the curve is twisted or if the dc-components of two different asymmetrical nonlinearities cancel out each other.

Um único tom abaixo da ressonância também gera uma pequena parte DC que move a bobina para o Bl máximo. Esse comportamento pode compensar parcialmente um deslocamento na posição de repouso da bobina. A parte DC desaparece na ressonância, onde a corrente e o deslocamento tornam-se 90 graus fora de fase. Em frequências mais altas, o comportamento de auto-centralização inverte e a bobina tende a deslizar para baixo, em qualquer inclinação da curva de $Bl(x)$. Mesmo em uma curva $Bl(x)$ perfeitamente simétrica, uma pequena perturbação pode iniciar este processo *coil-jump-out*. Isso mostra que o transdutor eletro-dinâmico é potencialmente instável. O força DC gerada pelo motor interage com a rigidez da suspensão em DC. Infelizmente, alguns materiais de suspensão tem uma rigidez significativamente menores em DC do que na frequência de ressonância f_s [24], conseqüentemente, as propriedades visco-elásticas do material da suspensão são importantes para a estabilidade da estrutura do motor. O ponto zero da parte DC ($X_{dc}=0$) no f_s é normalmente um sintoma exclusivo da não-linearidade de $Bl(x)$. Um ponto zero só pode ser produzido por outras não-linearidades ($L_e(x)$ e $K_{ms}(x)$) se a curva for torcida ou se as componentes DC de duas não-linearidades diferentes se anularem.

6.3. Symptoms of $L_e(x)$ Sintomas de $L_e(x)$

The $L_e(x)$ -nonlinearity supply distortion directly into the electrical circuit which can easily be detected in the input current. According Table 1 this nonlinearity multiplies current and displacement which are differentiated afterwards.

O não-linearidade de $L_e(x)$ supre a distorção diretamente no circuito elétrico, o que pode ser facilmente detectado na corrente de entrada. De acordo com a Tabela 1, a não-linearidade multiplica a corrente e o deslocamento, que são diferenciados posteriormente.

A $L_e(x)$ -nonlinearity produces relatively low harmonic distortion. At low frequencies both current and displacement are high but the differentiator attenuates the harmonics. At the resonance the current is low and at higher frequencies the displacement vanishes.

Uma não-linearidade de $L_e(x)$ produz relativamente baixa distorção harmônica. Em baixas frequências, tanto a corrente como o deslocamento são altos, mas o diferenciador atenua os harmônicos. Na ressonância, a corrente é baixa e em frequências mais altas, o deslocamento desaparece.

However, a two-tone signal may activate high intermodulation distortion because the low frequency tone f_1 provides high displacement and the high frequency tone f_2 sufficient current. It is a unique feature of the $L_e(x)$ -nonlinearity that the *IMD* detected in the current equals the *IMD* found in the sound pressure output. This is illustrated in Table 5 where the bass tone is varied and the distortion decays above resonance frequency.

No entanto, um sinal de dois tons podem ativar a alta distorção de intermodulação, pois o tom de baixa frequência f_l fornece alto deslocamento e o de alta frequência fornece corrente suficiente. É uma característica única da não-linearidade de $L_e(x)$: o IMD detectado na corrente é igual ao IMD encontrado na saída de pressão sonora. Isto é ilustrado na Tabela 5, onde o tom grave é variado e a distorção decai acima da frequência de ressonância.

Table 5 shows the *IMD* measured with the alternative sweeping technique where the voice tone is varied while keeping the bass tone at a constant frequency. This curve reveals the effect of the differentiator which causes an increase of about 6 dB/octave in the *IMD* and *AMD* response.

A Tabela 5 mostra o IMD medido com a técnica de varredura alternativa, na qual o tom de voz é variado, mantendo o tom grave em uma frequência constante. Esta curva revela o efeito do diferenciador que provoca um aumento de cerca de 6 dB / oitava na resposta IMD e AMD.

The reluctance force generates a unique symptom in the dc-displacement as shown in Table 4. Since the reluctance force is proportional to the squared input current, the force becomes minimal at the resonance frequency f_s . Furthermore, the force and resulting dc-displacement do not change the sign as long as the $L_e(x)$ curve shape is not twisted.

A força de relutância gera um sintoma único no deslocamento DC, como mostrado na Tabela 4. Quando a força de relutância for proporcional ao quadrado da corrente de entrada, a força torna-se mínima na frequência de ressonância f_s . Além disso, a força e o deslocamento DC resultante não mudam o sinal enquanto a curva $L_e(x)$ não for torcida.

6.4. Symptoms of $L_e(i)$ Sintomas de $L_e(i)$

The variation of the permeability expressed by the current varying inductance $L_e(i)$ causes a multiplication of current signals prior to the differentiation as shown Table 1. The intermodulation distortion measurement with varying bass tone frequency reveals a unique symptom. The *IMD* response has a characteristic minimum at the resonance frequency f_s as shown in Table 5. The *IMD* distortion and the harmonic distortion at higher frequencies measured in sound pressure and current are also identical. Contrary to the displacement varying nonlinearities ($Bl(x)$, $K_{ms}(x)$ and $L_e(x)$) this nonlinearity can also produce significant harmonic distortion (*HD*, *THD*) in both the input current and sound pressure output as shown in Table 4. Single tone harmonic distortion in current and sound pressure is comparable after transforming both results into the equivalent input distortion (EHD).

A variação da permeabilidade expressa pela indutância de corrente variável $L_e(i)$ causa uma multiplicação de sinais de corrente antes da diferenciação, de acordo com a Tabela 1. A medição de distorção de intermodulação com frequência variando em tons graves, revela um sintoma único. A resposta IMD tem uma característica mínima na frequência de ressonância f_s , como mostrado na Tabela 5. A distorção IMD e a distorção harmônica em frequências mais altas medidas na pressão sonora e na corrente também são idênticas. Ao contrário das não-linearidades de deslocamento variável ($Bl(x)$, $K_{ms}(x)$ e $L_e(x)$), esta não-linearidade pode produzir uma distorção harmônica significativa (HD, THD), tanto na entrada de corrente como na saída da

pressão sonora (Tabela 4). A distorção harmônica de único tom na corrente e na pressão sonora são comparadas, após a transformação de ambos resultados, para a distorção de entrada equivalente (EHD).

6.5. Symptoms of varying Cone Geometry Sintomas da variação da geometria do cone

This mechanism is directly related with the occurrence of break-up modes. Thus the distortion components are generated at relatively high frequencies ($>10f_s$). The distortion can easily be measured in the acoustical output but is hardly detectable in the input current. Comparing both measurements may be helpful to separate motor nonlinearities. A maximum in the frequency response of the equivalent harmonic input distortion (EHID) corresponds with break-up modes of high amplitude.

Este mecanismo está diretamente relacionado com a ocorrência dos modos *break-up*. Assim, as componentes de distorção são geradas em frequências relativamente altas ($> 10f_s$). A distorção pode ser facilmente medida na saída acústica, mas dificilmente é detectada na corrente de entrada. Comparar ambas medidas pode ajudar a separar as não-linearidades do motor. Máxima na resposta de frequência da distorção harmônica equivalente de entrada (EHID) corresponde com modos *break-up* de alta amplitude.

Scanning the cone and suspension surface and measuring the distortion directly in the mechanical system would give deeper insight into the nonlinear process.

A varredura do cone, a superfície de suspensão e a medição da distorção diretamente no sistema mecânico permitiriam uma compreensão aprofundada do processo não linear.

The intermodulation between a low and high-frequency tone is mostly amplitude modulation. The variation of the surround geometry changes the mechanical impedance at the end of the cone and has significant impact on the amplitude of particular modes.

A intermodulação entre um tom de baixa e de alta frequência é principalmente a modulação em amplitude. A variação da geometria da borda muda a impedância mecânica no final do cone e tem um impacto significativo na amplitude de modos particulares.

6.6. Symptoms of nonlinear E-modulus Sintomas do Módulo E não-linear

The variation of the Young's E -modulus produces similar symptoms as those due to variation of the cone and surround geometry. The measurement of harmonic distortion in the sound pressure output gives significant symptoms.

Intermodulation measurements should avoid a low frequency component because a bass tone will cause a significant deformation of the surround geometry which dominates the material nonlinearities.

A variação do Módulo de Young E produz sintomas semelhantes, devido à variação do cone e geometria da borda. A medição de distorção harmônica na saída de pressão sonora apresenta sintomas significativos.

Medições de intermodulação evitam uma componente de baixa frequência, pois um tom grave causará uma deformação significativa da geometria da borda, que domina as não-linearidades do material.

6.7. Symptoms of the Port Nonlinearity Sintomas da não-linearidade do duto

To evaluate the performance of the port the vented loudspeaker system is excited at the port resonance frequency (Helmholtz resonance) where volume velocity q is maximal but the displacement of the loudspeaker minimal. The harmonic distortion is measured in the sound pressure output at 1 m distance to get a good signal-to-noise ratio. Measurements closer to the port may be affected by air convection. To separate the effect of the port from other loudspeaker nonlinearities the displacement of the cone is also measured by using a laser system. The equivalent harmonic input distortion calculated from the sound pressure signal and the displacement become comparable, and the difference shows the contribution of the port. The third-order harmonic is usually dominant if the port geometry is symmetrical. Measurements of intermodulation distortion will not provide unique symptoms.

Para avaliar o desempenho do duto, o sistema de alto-falantes ventilados são excitados na frequência de ressonância do duto (ressonância *Helmholtz*), onde a velocidade de volume q é máxima e o deslocamento do alto-falante, mínimo. A distorção harmônica é medida na saída da pressão sonora a 1 m de distância para obter uma boa relação sinal-ruído. Medições mais próximos do duto podem ser afetada pela convecção do ar. Para separar o efeito do duto de outras não-linearidades do alto-falante, o deslocamento do cone também é medido por meio de um sistema à laser. A distorção harmônica equivalente de entrada, calculada a partir do sinal da pressão sonora e do deslocamento, tornam-se comparáveis e a diferença mostra a contribuição do duto. O harmônico de terceira ordem é geralmente dominante, quando a geometria do duto é simétrica. Medições de distorção de intermodulação não fornecerão sintomas únicos.

6.8. Symptoms of the Doppler Effect Sintomas do Efeito Doppler

The harmonic distortion measurement is not useful for detecting the Doppler Effect. A single signal tone can not provide both sufficient displacement and a short wavelength to produce a significant phase shift. The Doppler effect can be easily detected by performing an intermodulation measurement with a varying voice tone as illustrated in Table 5. Similar to the $L_e(x)$ -nonlinearity the intermodulation rises by 6dB per octave to higher frequencies. However, the Doppler effect causes only phase modulation and the value of the amplitude modulation (AMD) is low. Clearly the Doppler effect can not produce any distortion in the displacement and in the input current.

A medição de distorção harmônica não é útil para detectar o Efeito Doppler. Um tom de sinal único não pode fornecer o deslocamento e o comprimento de onda necessários para produzir uma

mudança de fase importante. O Efeito Doppler pode ser facilmente detectado através da realização de uma medição de intermodulação com um tom de voz variável, conforme ilustrado na Tabela 5. Semelhante à não-linearidade de $L_e(x)$, a intermodulação aumenta em 6dB por oitava para frequências mais altas. No entanto, o Efeito Doppler faz com que apenas a modulação de fase e o valor da modulação em amplitude (AMD) sejam baixos. Claramente o Efeito Doppler não pode produzir nenhuma distorção no deslocamento e na corrente de entrada.

6.9. Symptoms of Wave Steepening Sintomas da onda de maior inclinação

The nonlinear sound propagation is related to the multiplication of sound pressure components. Thus this nonlinearity produces not only intermodulation but also significant harmonics. This is a unique symptom that distinguishes Doppler Effect from wave steepening. The 2nd-order distortion rises by 6dB per octave while the 3rd-order distortion usually rises at a higher rate because it is generated from the 2nd-order components by an additional multiplication and differentiation in the following horn sections [14].

A propagação não-linear do som está relacionada com a multiplicação de componentes da pressão sonora. Assim, esta não-linearidade produz não apenas intermodulação, mas também harmônicos significativos. Este é um sintoma único que distingue o Efeito Doppler da onda de maior inclinação. A distorção de 2^a ordem aumenta em 6 dB por oitava, enquanto a distorção de 3^a ordem geralmente aumenta a uma taxa maior, devido a ela ser gerada a partir de componentes de 2^a ordem por uma multiplicação e diferenciação adicionais nas seções seguintes da corneta [14].

7. PRACTICAL DIAGNOSTICS RESULTADOS PRÁTICOS

The interaction and superposition of the different effects are now discussed on three real loudspeakers:

A interação e superposição dos diferentes efeitos são discutidos em 3 alto-falantes:

7.1. Speaker 1 with Coil offset Falante 1 com deslocamento da bobina

The first loudspeaker is a 6 inch woofer intended for high quality consumer application. The force factor characteristic $Bl(x)$ as shown in Figure 29 reveals a distinct plateau region corresponding with a voice coil overhang of about 6 mm.

O primeiro alto-falante é um *woofer* de 6" destinado à aplicação de alta qualidade. O fator força $Bl(x)$, como mostrado na Figura 29, revela uma região saliente distinta referente à uma bobina *overhang* de cerca de 6 mm. .

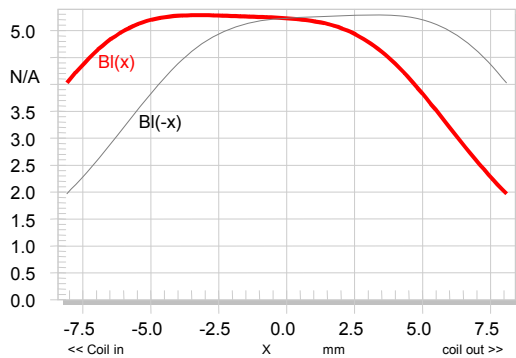


Figure 29: Measured force factor $Bl(x)$ versus displacement of speaker 1 (dashed curve shows the mirrored $Bl(-x)$ -characteristic)

Figura 29: Medidas do fator força $Bl(x)$ versus o deslocamento do falante 1 (curva tracejada mostra o $Bl(-x)$ espelhado)

The optimum rest position of the voice coil can be found by investigating the symmetry of the Bl -characteristic in Figure 30. Assuming a sinusoidal displacement of given *amplitude*, the coil will not see the same Bl -values at positive and negative peak displacement if the curve is asymmetric. By shifting the coil (*offset*) to the *symmetry point* (red dashed line in Figure 30) the same Bl -values at positive and negative peak values may be accomplished for a particular amplitude. If the symmetry point is independent of the amplitude then the asymmetry can completely be compensated by a constant voice coil shift. However, a compromise may be required as in the example shown in Figure 30 where the symmetry point varies from -3 mm at low amplitudes to -2 mm at higher amplitudes. The *symmetry region* (grey area) shows where a potential offset for given amplitude generates small asymmetrical variation ($< 5\%$) which are acceptable. At small amplitudes where the $Bl(x)$ -curve has the plateau, the symmetry region is wide indicating that the position of the overhang coil is not critical here. For larger amplitudes the voice coil has to be shifted by a negative offset (about -2 mm) that the coil leaves the gap symmetrically.

A posição de repouso ideal da bobina móvel pode ser encontrado analisando-se a simetria da característica Bl na Figura 30. Assumindo um deslocamento senoidal de uma dada amplitude, a bobina não terá o mesmo valor Bl em deslocamentos de pico positivos e negativos, se a curva for assimétrica. Ao deslocar a bobina (*offset*) para o ponto de simetria (linha vermelha tracejada na Figura 30) o mesmo valor Bl em valores de pico positivos e negativos pode ser feito para uma amplitude em particular. Se o ponto de simetria for independente da amplitude, então a assimetria pode ser completamente compensada por uma mudança constante da bobina móvel. No entanto, um compromisso pode ser exigido, como no exemplo mostrado na Figura 30, onde o ponto de simetria varia de -3 mm, em baixas amplitudes, a -2 mm, em maiores amplitudes. A região de simetria (área cinza) mostra aonde um deslocamento potencial, para uma dada amplitude, gera uma pequena variação assimétrica ($<5\%$) aceitável. Em pequenas amplitudes, onde a curva $Bl(x)$ possui uma saliência, a região de simetria é ampla, indicando que a posição da

bobina *overhang* não é crítica. Para maiores amplitudes, a bobina móvel tem que ser desviada para um deslocamento negativo (cerca de -2 mm) para que a bobina deixe o *gap* simetricamente.

The rest position of the voice coil in the gap is optimal if the dotted line representing the rest position (offset=0) is in the symmetry region (grey area). If this is not the case the symmetry point gives some indication for a voice coil shift.

A posição de repouso da bobina móvel no *gap* é ideal quando a linha pontilhada, representando a posição de repouso (*offset*=0), estiver na região de simetria (area cinza). Caso contrário, o ponto de simetria dará alguma indicação para um deslocamento da bobina móvel.

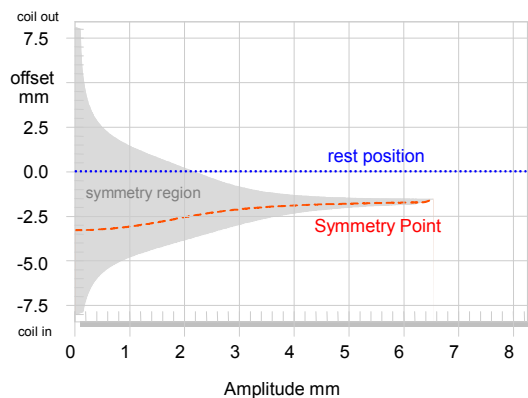


Figure 30: Symmetry point (red dashed line) and symmetry region (grey area) reveal an offset in the coil's rest position of speaker 1.

Figura 30: Ponto de simetria (linha vermelha tracejada) e região simétrica (área cinza) revelam um deslocamento na posição de descanso da bobina do falante 1.

The stiffness curve shown in Figure 31 has also a small asymmetry and $K_{ms}(x)$ increases for negative excursions to twice the value found at positive values. After removing 80 % of the surround material the measured stiffness of the remaining spider was almost symmetrical.

A curva de rigidez mostrada na Figura 31 possui também uma pequena assimetria, e $K_{ms}(x)$ aumenta em excursões negativas duas vezes mais do que em valores positivos. Depois de remover 80% do material da borda, a rigidez medida da aranha restante foi quase simétrica.

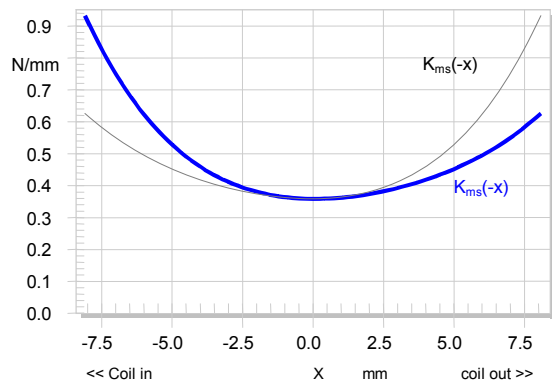


Figure 31: Stiffness $K_{ms}(x)$ versus displacement x of speaker 1 (dashed curve shows mirrored $K_{ms}(-x)$ -characteristic)

Figura 31: Rigidez $K_{ms}(x)$ versus o deslocamento x do falante 1 (curva tracejada mostra $K_{ms}(-x)$ espelhado)

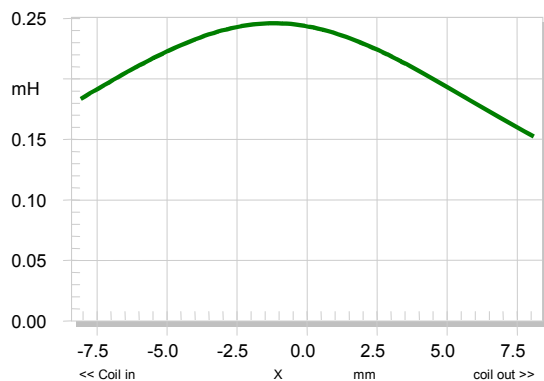


Figure 32: Inductance $L_e(x)$ versus displacement x of speaker 1

Figura 32: Indutância $L_e(x)$ versus o deslocamento x do falante 1

Figure 32 shows an almost symmetrical shape of the $L_e(x)$ which is not typical for this type of driver. The missing increase at negative displacement indicates that a shorting ring is used below the gap. The remaining maximum of inductance at $x=0$ may be reduced by placing an additional cap on the pole piece. However, the total inductance value is small (compared with the $R_e=3.5$ Ohm) and will not produce significant variation of the input impedance.

A Figura 32 mostra uma forma quase simétrica da $L_e(x)$, não usual para este tipo de *driver*. O leve aumento no deslocamento negativo indica que um anel de curto é usado abaixo do *gap*. O máximo remanescente de indutância em $x=0$ pode ser reduzido colocando-se uma tampa adicional sobre a peça polar. No entanto, o valor da indutância total é pequeno (comparado com o $R_e=3.5$ Ohm) e não produzirá uma variação significativa da impedância de entrada.

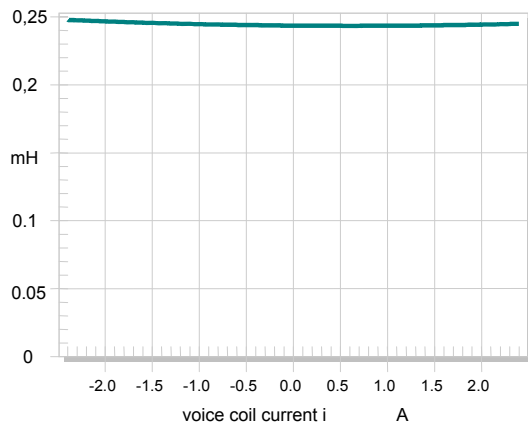


Figure 33: Inductance $L_e(i)$ versus current i of speaker 1
 Figura 33: Indutância $L_e(i)$ versus a corrente i do falante 1

The variation of the voice coil inductance $L_e(i)$ as shown in Figure 33 shows that the permeability of the magnetic path is almost constant. Here the permanent field generated by the magnet is much higher than the ac field generated by the coil.

A variação da indutância da bobina móvel $L_e(i)$, mostrada na Figura 33, mostra que a permeabilidade do caminho magnético é quase constante. Assim, o campo permanente gerado pelo ímã é muito maior que o campo AC gerado pela bobina.

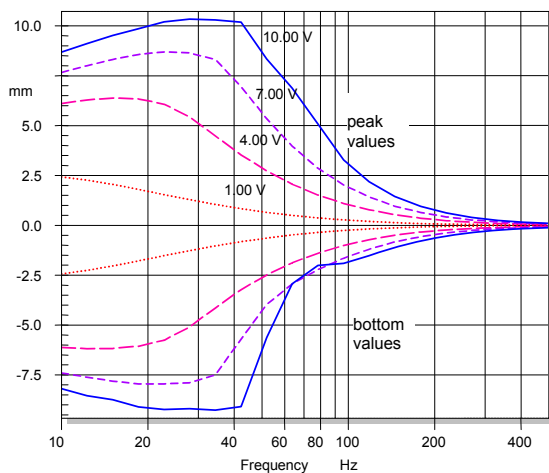


Figure 34: Measured peak and bottom value of voice coil displacement of speaker 1 versus frequency measured at four voltages

Figura 34: Medições dos valores de picos e inferiores do deslocamento da bobina móvel do falante 1 versus a frequência medida em quatro tensões

Figure 34 shows the peak and bottom of the voice coil displacement measured at four different voltages by a laser displacement meter. The shape of the curves varies with the input voltage. For

$U=IV$ the maximum of the displacement is far below resonance due to the high electrical damping and the low total loss factor Q_{ts} of the driver. However, at high voltages the electrical damping decreases (with $1/Bl(x)^2$) and the Q_{ts} becomes greater than 1. At frequencies shortly above resonance the bottom value stagnates at -2.5 mm while the peak values rise rapidly with the input voltage. This corresponds with a dc-part generated in the displacement. This is investigated in Figure 35 in greater detail.

A Figura 34 mostra os pontos máximo e mínimo do deslocamento da bobina móvel medida em 4 tensões diferentes através de um deslocamento à laser. A forma da curva varia de acordo com a tensão de entrada. Para $U=IV$, o máximo do deslocamento é bem inferior à ressonância devido ao alto amortecimento elétrico e ao fator de perda total Q_{ts} do *driver*. Entretanto, em altas tensões, o amortecimento elétrico diminui (com $1/Bl(x)^2$) e o Q_{ts} torna-se maior que 1. Em frequências um pouco acima da ressonância, o valor do ponto mínimo fica em $-2,5$ mm enquanto o valor de pico cresce rapidamente com a tensão de entrada. Isto corresponde à parte DC gerada no deslocamento e pode ser analisado mais detalhadamente na Figura 35.

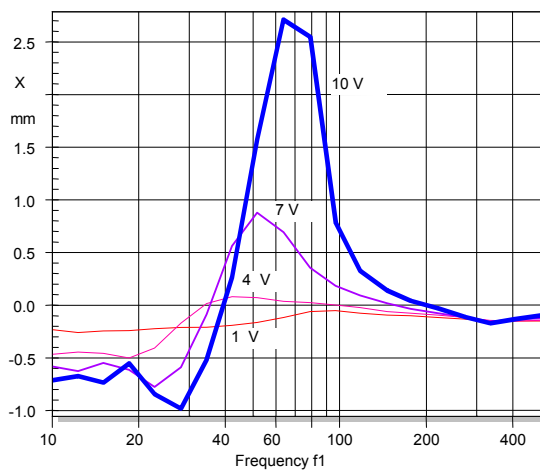


Figure 35: Measured dc-displacement of speaker 1 measured versus frequency and at four voltages

Figura 35: Medição do deslocamento DC do falante 1 *versus* a frequência em quatro tensões

The sign of the dc part changes at the resonance frequency $f_s = 35$ Hz. For frequencies below f_s the dc part is about -0.5 mm and stays almost constant for high amplitudes of the ac signal. Here the asymmetry of $Bl(x)$ generates a dc-force which moves the coil towards the Bl -maximum. At frequencies above f_s the consequences of the voice coil offset become obvious. The dc part becomes positive and rises quickly with amplitude (*coil jump-out effect*). The asymmetry of the stiffness $K_{ms}(x)$ as shown in Figure 31 generates a positive contribution to the dc-part and the inductance $L_e(x)$ a negative dc. However, both parts are negligible in comparison to the dc-part generated by $Bl(x)$.

O sinal da parte DC muda na frequência de ressonância $f_s = 35$ Hz. Para frequências abaixo de f_s , a parte DC está em cerca de $-0,5$ mm e permanece quase constante para grandes amplitudes do

sinal AC. Neste caso, a assimetria de $Bl(x)$ gera uma força DC que move a bobina para o Bl máximo. Em frequências acima de f_s , as conseqüências do deslocamento da bobina móvel tornam-se evidentes, a parte DC torna-se positiva e sobe rapidamente com a amplitude (efeito *coil jump-out*). A assimetria da rigidez $K_{ms}(x)$, mostrada na Figura 31, gera uma contribuição positiva para o parte DC, enquanto que a indutância $L_e(x)$, gera uma negativa. No entanto, ambas as partes são desprezíveis, comparadas com a parte DC gerada pelo $Bl(x)$.

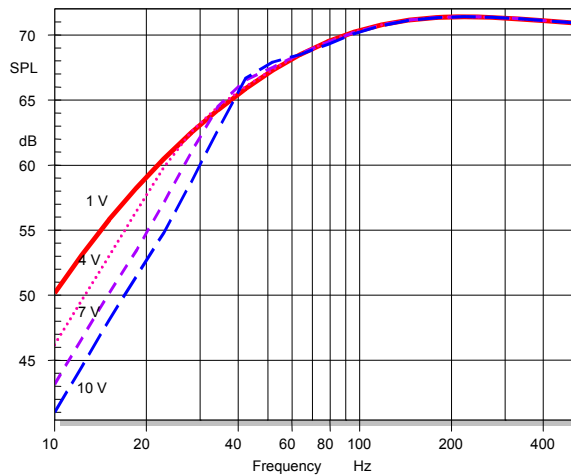


Figure 36: Sound pressure response $P_r(f, U_i)$ measured at four voltages (3 V increments) which are referred to $U_i=1 V$ to reveal the amplitude compression of the fundamental in speaker 1
 Figura 36: Resposta da pressão sonora $P_r(f, U_i)$ medida em quatro tensões (incremento de 3V), referentes à $U_i = 1 V$, para revelar a compressão de amplitude da fundamental no falante 1

Figure 36 shows the frequency response of the fundamental in the sound pressure output measured at four voltages but referred to the measurement in the small signal domain ($U_i=1V$) according Eq. (1). Since the increase of the voltage is compensated this representation shows the power compression directly. At higher frequencies where the displacement becomes small there is no compression and the sensitivity stays constant. If the measurement time would be extended the heating of the coil would cause an additional amplitude compression (thermal effect). At low frequencies the SPL reduces by 8 dB due to the nonlinear effects. At the resonance the vanishing electrical damping causes a negative compression and the loudspeaker produces more output.

A Figura 36 mostra a resposta de freqüência da fundamental na saída da pressão sonora medida em quatro tensões, porém referida à medição no domínio de um sinal pequeno ($U_i=1V$) de acordo com a Eq. (1). Desde que o aumento da tensão seja compensado, esta representação mostrará o poder de compressão diretamente. Em freqüências mais altas, onde o deslocamento torna-se pequeno, não há compressão e a sensibilidade permanece constante. Se o tempo de medição for estendido, o aquecimento da bobina causará uma compressão em amplitude adicional (efeito térmico). Em baixas freqüências, o SPL reduz em 8 dB devido aos efeitos não-lineares. Na ressonância, o amortecimento de fuga elétrico provoca uma compressão negativa e o alto-falante produz mais saída.

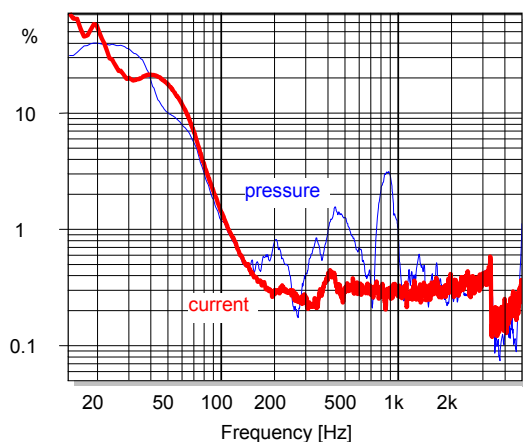


Figure 37: Equivalent total harmonic input distortion (*ETHD*) measured in the sound pressure output (thin curve) and in the voice coil current (thick curve) of speaker 1

Figura 37: Distorção harmônica de entrada equivalente total (*ETHD*), medida na saída de pressão sonora (curva fina) e na corrente da bobina móvel (curva grossa) do falante 1

The displacement varying force factor $Bl(x)$ and stiffness $K_{ms}(x)$ generate high total harmonic distortion in the sound pressure output and in the voice coil current. To compare both signals the concept of equivalent input distortion according Eq. (8) is used. The distortion components measured in sound pressure output and current are transformed to the input (which is a voltage for a normal amplifier with low output impedance) and are presented in Figure 37 as thin and thick curves, respectively. At higher frequencies ($f > 200$ Hz) the distortion components in the current are very low (less than 0.5 %) and are caused by the $L_e(i)$ -nonlinearity. The other nonlinearities ($Bl(x)$, $L_e(x)$ and $K_{ms}(x)$) are displacement dependent and can not generate significant harmonic distortion. At particular frequencies e.g. 400 Hz and 800 Hz, nonlinearities in the mechanical domain (cone break-ups) produce additional distortion which interfere with the distortion found in the current. Cancellation of the two distortion components only occurs at 250 Hz but both parts usually increase the total distortion at other frequencies.

O deslocamento variando o fator de força $Bl(x)$ e a rigidez $K_{ms}(x)$ geram uma elevada distorção harmônica total na saída da pressão sonora e na corrente da bobina móvel. Para comparar ambos sinais ao conceito de distorção de entrada equivalente, é utilizada a Eq. (8). As componentes de distorção medidas na saída da pressão sonora e na corrente são transformadas para a entrada (que é uma tensão por um amplificador normal com baixa impedância de saída) e são apresentadas na Figura 37, representadas por curvas finas e grossas, respectivamente. Em altas frequências ($f > 200$ Hz), as componentes de distorção na corrente são muito baixas (menor que 0,5%) e são causadas pela não-linearidade de $L_e(i)$. As outras não-linearidades ($Bl(x)$, $L_e(x)$ e $K_{ms}(x)$) dependem do deslocamento e não geram distorção harmônica significativa. Em frequências particulares, por exemplo, 400 Hz e 800 Hz, não-linearidades no domínio mecânico (cones *break-ups*) produzem distorções adicionais que interferem com a distorção encontrada na

corrente. Cancelamento das duas componentes de distorção só ocorre a 250 Hz, mas geralmente em outras frequências, ambas partes aumentam a distorção total.

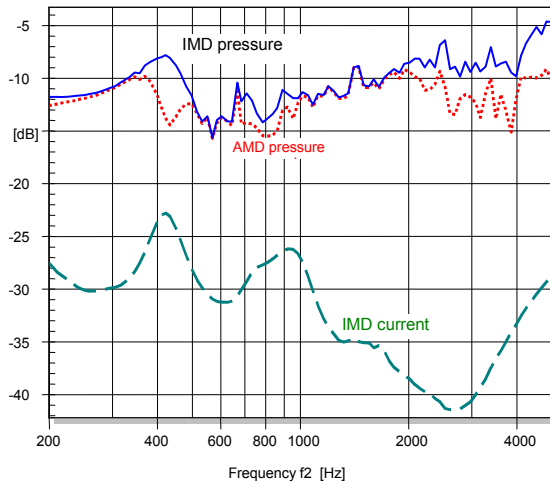


Figure 38: Total intermodulation distortion (IMD_{Total}) of speaker 1 measured in sound pressure and in voice coil current and amplitude modulation distortion (AMD) in the sound pressure versus frequency f_2 of the voice tone (constant bass tone at $f_1=10$ Hz)

Figura 38: Distorção por intermodulação total (IMD_{Total}) do falante 1, medido na pressão sonora e na corrente da bobina móvel, e distorção da modulação em amplitude (AMD) na pressão sonora versus a frequência f_2 do tom de voz (tom baixo constante em $f_1=10$ Hz)

Figure 38 shows the intermodulation distortion measured with a two-tone stimulus comprising a voice tone with variable frequency f_2 and a bass tone at fixed frequency $f_1=10$ Hz. The total intermodulation IMD_{total} , measured in the sound pressure output and shown as thin line, are 20 dB higher than the intermodulation found in the input current which are shown as dashed line. Thus the intermodulation components caused by $L_e(x)$ and $L_e(i)$ are almost negligible compared with the contribution of the other nonlinearities.

A Figura 38 mostra a distorção de intermodulação medida com um estímulo de dois tons compreendendo um tom de voz com frequência variável f_2 e um tom grave de frequência fixa $f_1=10$ Hz. A intermodulação total IMD_{total} , medida na saída da pressão sonora e mostrada através de uma linha fina, é 20 dB maior que a intermodulação encontrada na corrente de entrada, representada por uma linha tracejada. Assim, as componentes de intermodulação causada por $L_e(x)$ e $L_e(i)$ são quase desprezíveis comparadas com outras não-linearidades.

Figure 38 also shows that the intermodulation distortion components below 2kHz are caused by amplitude modulation (AM). For frequencies below 400 Hz the AMD and IMD -values are almost constant which is typical for the $Bl(x)$ -nonlinearity as illustrated in Table 5. At 400 Hz the cone performs the first partial vibration which is modulated by the varying surround geometry. Above 2 kHz the rising distortion is generated by frequency modulation.

Também na Figura 38 pode-se observar que as componentes de distorção de intermodulação abaixo 2kHz são causadas por modulação em amplitude (AM). Para frequências abaixo de 400 Hz, os valores de AMD e IMD são quase constantes, o que é típico para a não-linearidade de $Bl(x)$, conforme ilustrado na Tabela 5. Em 400 Hz o cone realiza a primeira vibração parcial, que é modulada pela geometria variável da borda. Acima de 2 kHz, a distorção crescente é gerada pela modulação em frequência.

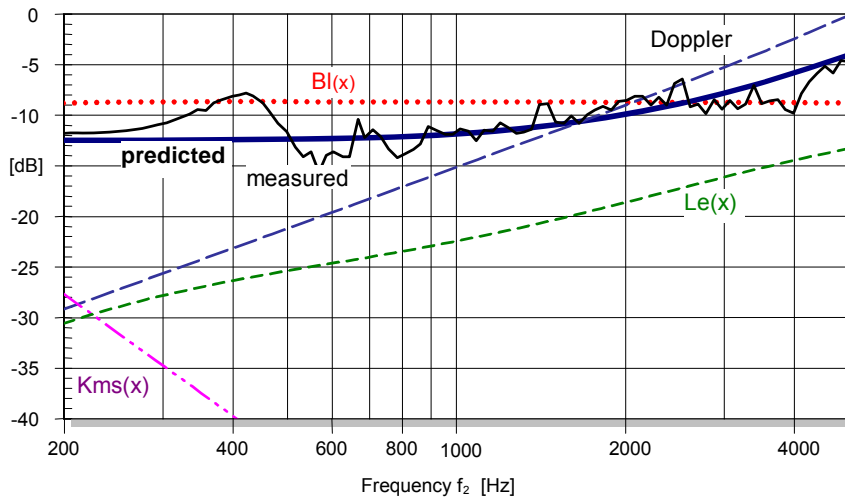


Figure 39: Measured and predicted intermodulation distortion (IMD_{total}) of speaker 1 compared with the contribution of each nonlinearity (sweeping the *voice tone*)

Figura 39: Distorção por intermodulação medida e prevista (IMD_{total}) do falante 1 comparado com a contribuição de cada não-linearidade (varredura de tom de voz)

Further insight into the generation of the intermodulation distortion may be gained with use of the simulation tool (SIM2) of the Distortion Analyzer [26] where the total intermodulation can be predicted and the contribution of each nonlinearity can be investigated systematically.

Uma visão mais aprofundada sobre a geração da distorção de intermodulação pode ser obtida com o uso da ferramenta de simulação (SIM2), do Analisador de Distorção [26], onde a intermodulação total pode ser prevista e a contribuição de cada não-linearidade pode ser analisada de forma sistemática.

The predicted and measured curves as shown in Figure 39 agree very well. The nonlinear cone vibration is not considered in the model but can easily be separated from the motor and suspension nonlinearities. Considering the contribution of the $Bl(x)$ only and switching off all of the remaining nonlinearities ($K_{ms}(x)=const.$, $L_e(x,i)=const.$, ...) the calculated IMD distortion is presented as dotted a curve. This curve is constant according to the theoretical shape presented in Table 5 and is the same order of magnitude as the predicted curve considering all nonlinearities. The distortion below 2kHz can be significantly reduced by shifting the rest position of the coil 1.5 mm toward the back-plate. Above 2kHz the Doppler effect becomes dominant and produces

significant phase modulation, shown as the dashed line in Table 5. However, phase modulation has less impact on the perceived sound quality than amplitude modulation which is perceived as an unpleasant roughness in the reproduced signal.

As curvas previstas e medidas, como mostradas na Figura 39, concordam muito bem. A vibração não-linear do cone não é considerada no modelo, mas pode ser facilmente separada das não-linearidades do motor e da suspensão, considerando-se apenas a contribuição do $Bl(x)$ e desligando-se todas as não-linearidades restantes ($K_{ms}(x)=const.$, $L_e(x,i)=const.$, ...). A distorção IMD calculada é apresentada como uma curva pontilhada. Esta curva é constante de acordo com a forma teórica apresentada na Tabela 5 e é a mesma ordem de grandeza que a curva prevista considerando-se todas as não-linearidades. A distorção abaixo de 2kHz pode ser significativamente reduzida, mudando-se a posição de repouso da bobina de 1,5 mm para a placa traseira. Acima de 2kHz, o Efeito Doppler torna-se dominante e produz modulação de fase significativa, mostrado com a linha tracejada na Tabela 5. No entanto, a modulação de fase tem menos impacto sobre a qualidade do som percebido do que a modulação em amplitude, que é percebida como uma aspereza desagradável no sinal reproduzido.

The predicted intermodulation generated by $L_e(x)$ corresponds with the small values found in the input current in Figure 38 .

A intermodulação prevista gerada pelo $L_e(x)$ corresponde com os pequenos valores encontrados na corrente de entrada na Figura 38.

The low *IMD* values of the stiffness $K_{ms}(x)$ correspond with Table 3 showing that intermodulation distortion is not a significant symptom of the suspension nonlinearity.

Os baixos valores *IMD* da rigidez $K_{ms}(x)$ (Tabela 3), mostram que a distorção de intermodulação não é um sintoma importante para a não-linearidade da suspensão.

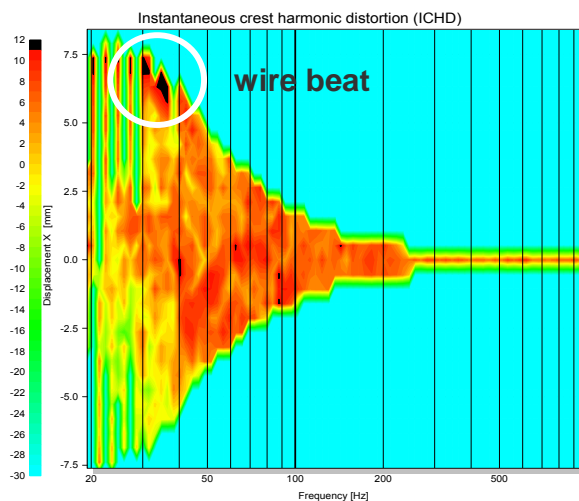


Figure 40: Measured instantaneous crest factor of harmonic distortion (color coded) plotted versus frequency and voice coil displacement

Figura 40: Medição instantânea do fator de crista da distorção harmônica (codificados por cores) plotados em função da frequência e do deslocamento da bobina móvel

Finally the loudspeaker is checked for transient and impulsive distortion which have a high peak value but a relatively low *rms*-value. Figure 40 shows the instantaneous crest factor *ICHD* which is coded by the color and displayed versus frequency (x-axis) and displacement (y-axis). Below 7 mm the crest factor of harmonic distortion is less than 10 dB (blue to red) which is typical for regular nonlinearities in the motor, suspension or cone. However, at high positive displacement occurring at low frequencies ($f < 40$ Hz) the crest factor exceeds 10 dB (becoming black) which indicates a nonlinear mechanism producing short clicks at the particular coil position. Further examination of the driver revealed that the flex wires hit the cone at this point.

Finalmente o alto-falante está conferido para a distorção transitória e impulsiva, as quais possuem um alto valor de pico, porém um valor rms relativamente baixo. A Figura 40 mostra o fator de crista instantâneo, *ICHD*, codificado pela cor e exibido em função da frequência (eixo x) e do deslocamento (eixo y). Abaixo de 7 mm, o fator de crista da distorção harmônica é menor que 10 dB (azul para vermelho), o que é típico para não-linearidades regulares no motor, suspensão ou cone. No entanto, para grandes deslocamentos positivos, ocorridos em baixas frequências ($f < 40$ Hz), o fator de crista é superior a 10 dB (tornando-se preto), indicando um mecanismo não-linear e produzindo curto em uma posição particular da bobina. Uma análise mais aprofundada do *driver* revelou que os fios flexíveis acertaram o cone neste momento.

7.2. Speaker with Suspension problem Falante com problema de suspensão

Loudspeaker 2 is a 5 inch woofer which is also intended for consumer application.

O alto-falante 2 é um *woofer* de 5" destinado à aplicação do consumidor.



Figure 41: Force factor $Bl(x)$ versus displacement of speaker 2 (thin curve shows mirrored $Bl(-x)$ -characteristic)

Figura 41: Força fator $Bl(x)$ versus o deslocamento do falante 2 (curva fina mostra $Bl(-x)$ espelhado)

The force factor $Bl(x)$ shown in Figure 41 is relatively linear by using a high coil overhang. The curve has no plateau but a gradual decay because the fringe field outside the gap is much higher than in speaker 1.

O fator força $Bl(x)$ mostrado na Figura 41, é relativamente linear ao usar uma bobina *overhang*. A curva não tem saliência, porém possui uma queda gradual, pois o campo magnético fora do *gap* é muito maior que no falante 1.

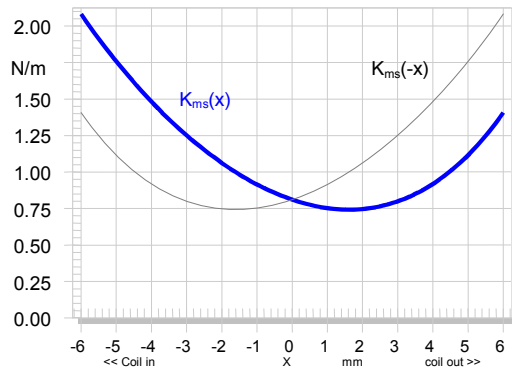


Figure 42: Stiffness $K_{ms}(x)$ versus displacement x of speaker 2 (thin curve shows mirrored $K_{ms}(-x)$ -characteristic)

Figura 42: Rigidez $K_{ms}(x)$ versus o deslocamento x do falante 2 (curva fina mostra $K_{ms}(-x)$ espelhado)

The stiffness curve in Figure 42 has a severe asymmetry. This is shown to be by the spider because a similar curve is found in a second measurement after removing 80 % of the surround material.

A curva de rigidez na Figura 42 tem uma grave assimetria. Isso ocorre provavelmente pela aranha, pois uma curva semelhante é encontrada em uma segunda medição após a remoção de 80% do material da borda.

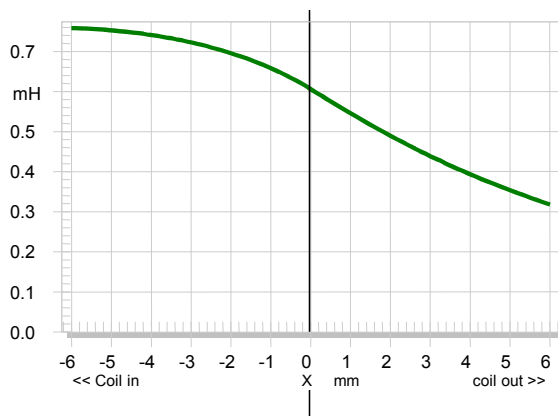


Figure 43: Inductance $L_e(x)$ versus displacement x of speaker 2

Figura 43: Indutância $L_e(x)$ versus o deslocamento x do falante 2

The inductance $L_e(x)$ is also asymmetric and rises for negative excursion of the coil to the back-plate. This is typical for a motor without any shorting material. While the inductance $L_e(x)$ versus displacement varies by 100 % the inductance $L_e(i)$ versus input current i in Figure 44 varies only by 10 %.

A indutância $L_e(x)$ também é assimétrica e sobe para a excursão negativa da bobina para a placa traseira. Isto é típico para um motor sem material de curto-circuito. Enquanto a indutância $L_e(x)$ *versus* o deslocamento varia em 100%, a indutância $L_e(i)$ *versus* a corrente de entrada i varia apenas em 10% (Figura 44).

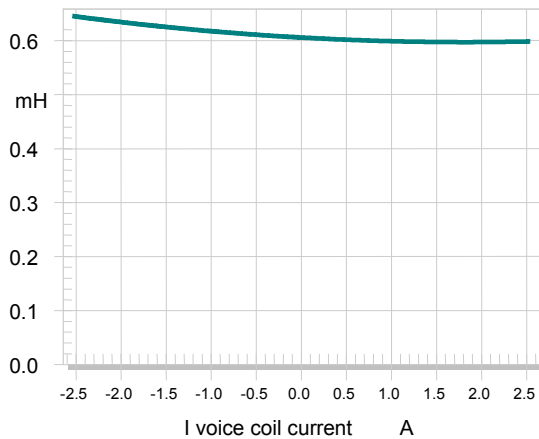


Figure 44: Inductance $L_e(i)$ versus current i of loudspeaker 2
 Figura 44: Indutância $L_e(i)$ versus a corrente i do alto-falante 2

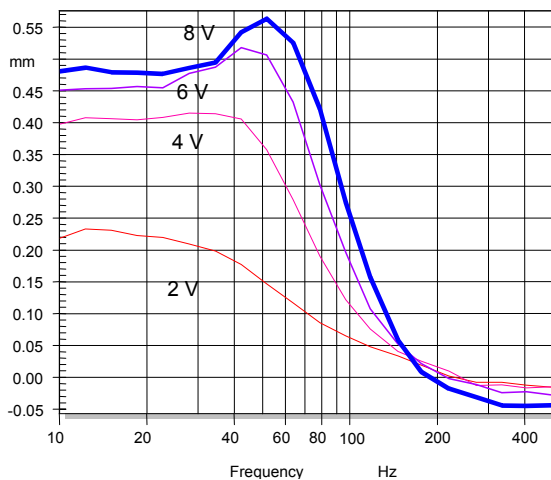


Figure 45: Measured dc-displacement versus frequency measured at four different voltages of loudspeaker 2
 Figura 45: Medição do deslocamento DC *versus* a frequência, medidos em quatro diferentes tensões do alto-falante 2

The measured dc-displacement as shown in Figure 45 agrees with the asymmetries found in the nonlinear parameters. The asymmetric stiffness generates a positive displacement because the suspension is much softer for positive than negative displacement. The dc-displacement becomes maximãl at the resonance frequency where the amplitude of the current is minimãl and the other nonlinearities give a smaller contribution to the dc-part. At higher frequencies the stiffness

asymmetry can not produce a significant dc-part because the displacement is small. Only the reluctance force generates a small negative dc-displacement in this frequency range and moves the coil in a negative direction where the inductance $L_e(x)$ becomes higher.

O deslocamento DC medido, mostrado na Figura 45, está de acordo com as assimetrias encontradas nos parâmetros não-lineares. A rigidez assimétrica gera um deslocamento positivo, pois a suspensão é muito mais suave para o deslocamento positivo do que para o negativo. O deslocamento DC torna-se máximo na frequência de ressonância, onde a amplitude da corrente é mínima e as outras não-linearidades contribuem um pouco para a parte DC. Em frequências mais altas, a assimetria da rigidez não pode produzir uma parte DC significativa, pois o deslocamento é pequeno, somente a força de relutância gera um pequeno deslocamento DC negativo nesta faixa de frequência e move a bobina em um sentido negativo, onde a indutância $L_e(x)$ torna-se maior.

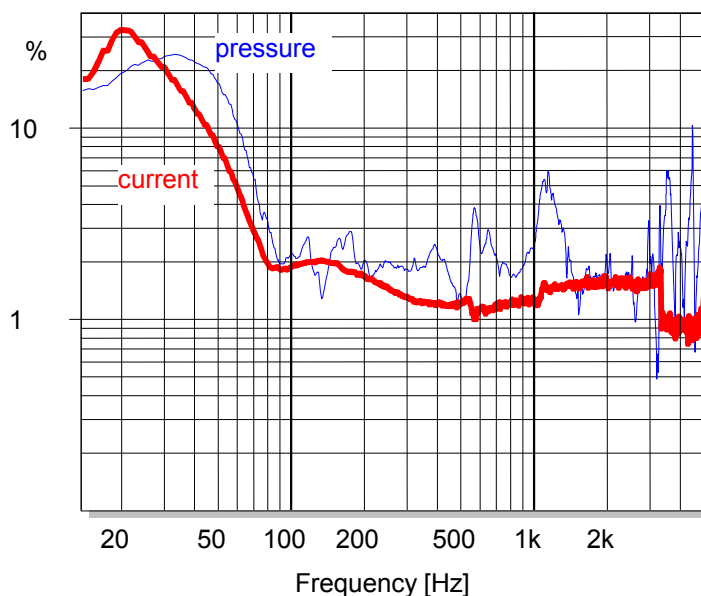


Figure 46: Equivalent total harmonic input distortion (*ETHD*) measured in the sound pressure output (thin curve) and in the voice coil current (thick curve) of loudspeaker 2

Figura 46: Distorção harmônica de entrada equivalente total (*ETHD*), medida na saída de pressão sonora (curva fina) e na corrente da bobina móvel (curva grossa) do alto-falante 2

Figure 46 compares the harmonic distortion found in the input current and in the sound pressure output. At the resonance frequency and below, most of the harmonic distortion found in current and sound pressure is caused by the nonlinear suspension. For frequencies above 80 Hz the nonlinear inductance $L_e(i)$ of Figure 44 generates 1 .. 2 % in the input current. The distortion measured in the sound pressure response show contributions from the other displacement varying nonlinearities ($Bl(x)$, $L_e(x)$ and $K_{ms}(x)$) below 1000 Hz and interferences from nonlinear cone vibration at higher frequencies.

A Figura 46 compara a distorção harmônica, encontrada na corrente de entrada e na saída da pressão sonora. Na frequência de ressonância e abaixo desta, a maioria das distorções harmônicas encontradas na corrente e na pressão sonora são provocadas pela suspensão não-linear. Para frequências acima de 80 Hz, a indutância não-linear $L_e(i)$ da Figura 44 gera 1 .. 2% na corrente de entrada. A distorção medida na resposta da pressão sonora mostra contribuições de outras não-linearidades de deslocamento variável ($Bl(x)$, $L_e(x)$ and $K_{ms}(x)$) abaixo de 1000 Hz e interferências da vibração não-linear do cone em frequências mais altas.

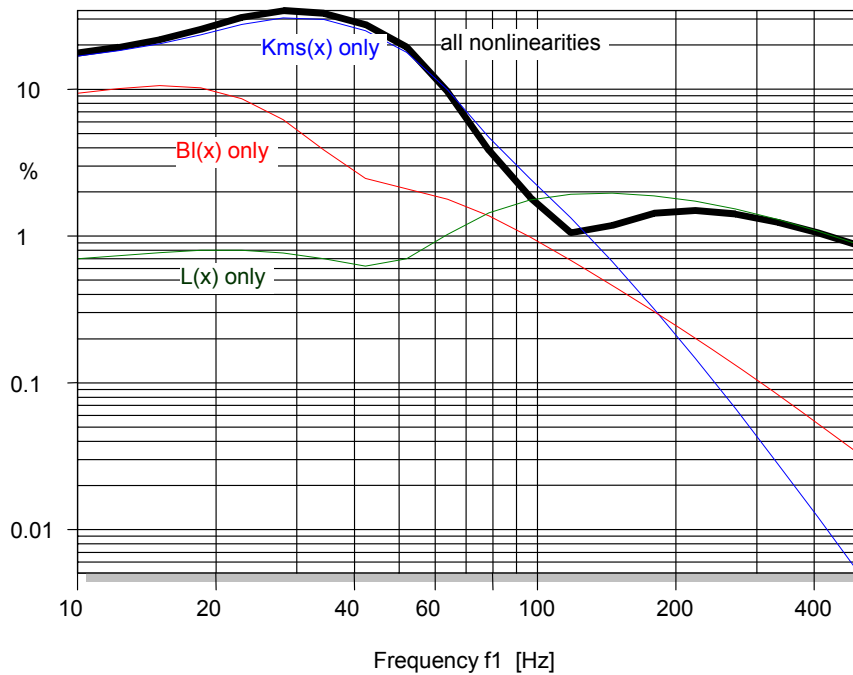


Figure 47: Equivalent total harmonic input distortion predicted by using all nonlinearities (solid curve) and in the sound pressure output (thin curve) and in the voice coil current (thick curve) of loudspeaker 2.

Figura 47: Distorção harmônica de entrada equivalente total prevista usando todas as não-linearidades (curva sólida), na saída da pressão sonora (curva fina) e na corrente da bobina móvel (curva grossa) do alto-falante 2.

The identified nonlinear parameters allow one to investigate the contribution of each nonlinearity in greater detail. Figure 47 shows that the stiffness $K_{ms}(x)$ is the dominant cause for the *ETHD*. The force factor $Bl(x)$ produces only 10 % distortion and the inductance $L_e(x)$ produces 1 -2 %.

Os parâmetros não-lineares identificados, permitem analisar a contribuição de cada não-linearidade mais detalhadamente. A Figura 47 mostra que a rigidez $K_{ms}(x)$ é a causa dominante para a *ETHD*. O fator força $Bl(x)$ produz uma distorção de apenas 10% e a indutância $L_e(x)$ produz 1% -2.

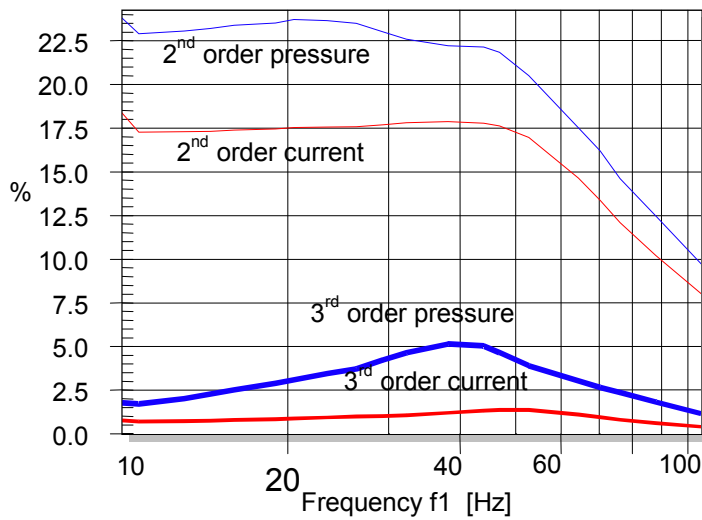


Figure 48: 2nd-order and 3rd-order intermodulation distortion measured in voice coil current and sound pressure output of loudspeaker 2 (varying bass tone, $f_2=500$ Hz)

Figura 48: 2^a e 3^a ordem da distorção por intermodulação medidas na corrente da bobina móvel e na saída da pressão sonora do alto-falante 2 (variando tom grave, $f_2=500$ Hz)

Figure 48 reveals high 2nd-order intermodulation distortion $IMD_2 \approx 20\%$. This is caused by the $L_e(x)$ -nonlinearity because almost the same values are found in the current and pressure signals and there is no dip at resonance frequency f_s . Due to the asymmetrical shape of $L_e(x)$ the 2nd-order component IMD_2 is much higher than the 3rd-order component IMD_3 .

A Figura 48 revela alta distorção de intermodulação de 2^a ordem $IMD_2 \approx 20\%$. Isto é causado pela não-linearidade de $L_e(x)$, já que quase os mesmos valores são encontrados nos sinais de corrente e pressão e não há queda na frequência de ressonância f_s . Devido à forma assimétrica de $L_e(x)$, a componente de 2^a ordem IMD_2 é muito maior do que a componente de 3^a ordem IMD_3 .

7.3. Loudspeaker 3 with flux modulation Alto-falante 3 com modulação de fluxo

Loudspeaker 3 is a 12 inch speaker intended for automotive application. Figure 49 reveals a very symmetrical $Bl(x)$ characteristic which is almost constant up to 15 mm peak value.

O alto-falante 3 é um falante de 12" destinado à aplicação automotiva. A Figura 49 revela uma característica de $Bl(x)$ bem simétrica, quase constante até o valor de pico em 15mm.

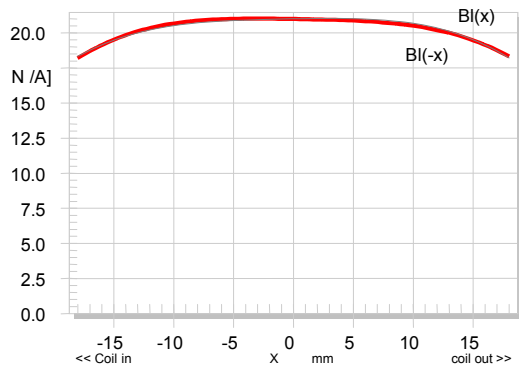


Figure 49: Force factor $Bl(x)$ versus displacement of loudspeaker 3 (thin curve shows mirrored $Bl(-x)$ -characteristic)

Figura 49: Força fator $Bl(x)$ versus o deslocamento do alto-falante 3 (curva fina mostra $Bl(-x)$ espelhado)

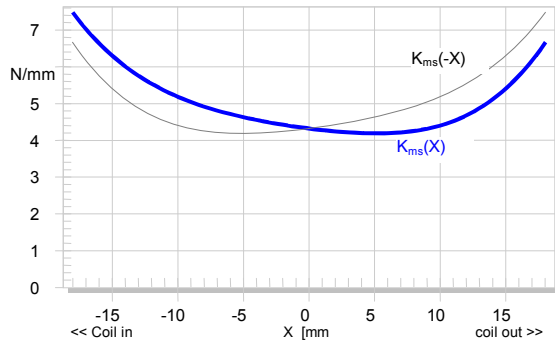


Figure 50: Stiffness $K_{ms}(x)$ versus displacement x of loudspeaker 3 (thin curve shows mirrored $K_{ms}(-x)$ -characteristic)

Figura 50: Rigidez $K_{ms}(x)$ versus o deslocamento x do alto-falante 3 (curva fina mostra $K_{ms}(-x)$ espelhado)

The stiffness $K_{ms}(x)$ of the suspension as shown in Figure 50 is also almost symmetrical. The surround made of thick rubber material causes a minor asymmetry. However, the voice coil inductance varies significantly with displacement and current as shown in Figure 51 and Figure 52, respectively.

A rigidez $K_{ms}(x)$ da suspensão, como mostrado na Figura 50, também é quase simétrica. A borda, feita de borracha espessa, provoca uma menor assimetria, no entanto, a indutância da bobina varia significativamente com deslocamento e com a corrente, como mostrado na Figura 51 e Figura 52, respectivamente.

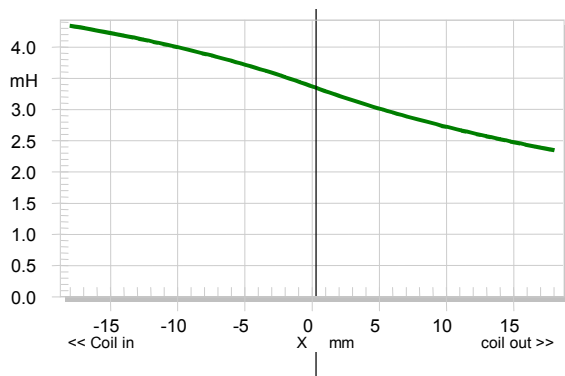


Figure 51: Inductance $L_e(x)$ versus displacement x of loudspeaker 3
 Figura 51: Indutância $L_e(x)$ versus o deslocamento x do alto-falante 3

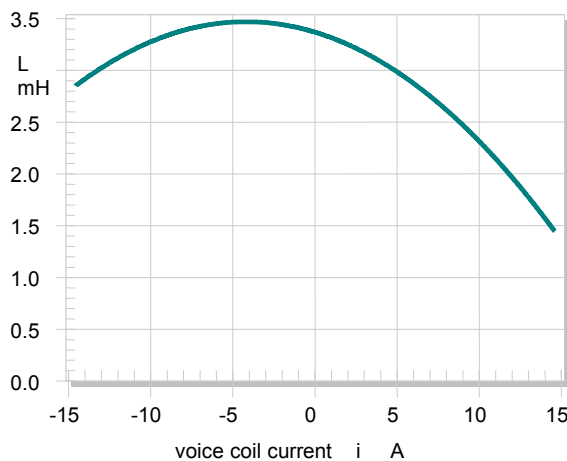


Figure 52: Inductance $L_e(i)$ versus current i of loudspeaker 3
 Figura 52: Indutância $L_e(i)$ versus a corrente i do alto-falante 3

The asymmetrical shape is typical for a motor without any shorting material. The 3.5 mH inductance dominates the electrical input impedance at higher frequencies. During the large signal parameter measurement (LSI) the peak value of current and displacement exceeded 15 ampere and 18 mm, respectively, which caused significant variations of electrical input impedance at higher frequencies. The $L_e(x)$ is more asymmetric than the $L_e(i)$ characteristic.

A forma assimétrica é típica para um motor sem material de curto-circuito. A indutância 3,5 mH domina a impedância elétrica de entrada em frequências mais altas. Durante a medição do parâmetro do sinal de grande amplitude (LSI), o valor de pico de corrente e deslocamento ultrapassou 15 A e 18 mm, respectivamente, o que causou variações significativas da impedância elétrica de entrada em frequências mais altas. A $L_e(x)$ é mais assimétrica do que a característica $L_e(i)$.

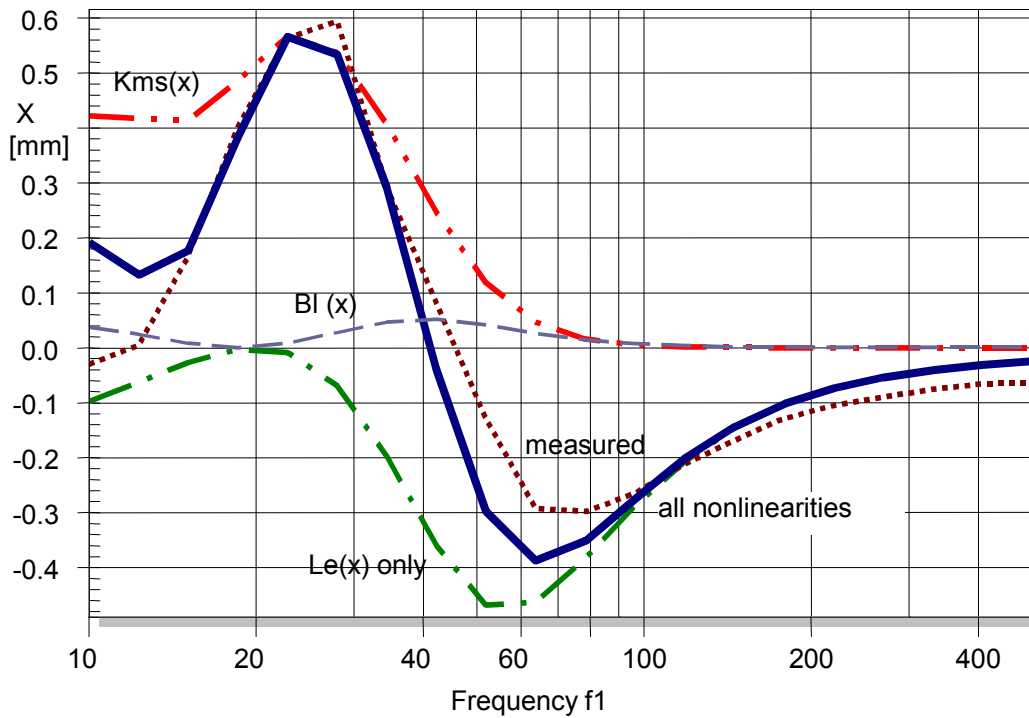


Figure 53: dc-displacement versus frequency measured (dotted line) and predicted by considering all nonlinearities (thick line) and the contribution of each nonlinearity $Bl(x)$, $K_{ms}(x)$ and $L_e(x)$ of loudspeaker 3

Figura 53: Deslocamento DC *versus* a frequência medida (linha pontilhada) e prevista, considerando todas as não-linearidades (linha em negrito) e a contribuição de cada um não-linearidade $Bl(x)$, $K_{ms}(x)$ e $L_e(x)$ do alto-falante 3

Figure 53 shows the frequency response of the dc-displacement measured by a sensor and predicted by using the large signal parameters in the simulation software (SIM) [25]). At the resonance frequency of 25 Hz the positive dc-part of 0.6 mm is caused by the suspension which is softer for positive than for negative displacement as shown in Figure 50. The symmetrical $Bl(x)$ -characteristic generates almost no dc-part. However, the asymmetric inductance $L_e(x)$ in Figure 51 generates a negative dc-part below and above f_s . At very low frequencies (10 Hz) the negative dc part of the inductance reduces the positive dc-part generated by the suspension. At higher frequencies (80 Hz) where the current becomes high again but the displacement is small the reluctance force dominates the total dc-displacement. The zero point ($X_{dc}=0$) at 50 Hz is not generated by an asymmetric $Bl(x)$ but is caused by the interaction of two asymmetrical nonlinearities.

A Figura 53 mostra a resposta de frequência do deslocamento DC medida e prevista por um sensor e usando os parâmetros de grandes sinais no software de simulação (SIM) [25]). Na frequência de ressonância de 25 Hz, a parte DC positiva de 0,6 mm é causada pela suspensão que é mais suave para positivo do que para o deslocamento negativo, como mostrado na Figura 50. A característica simétrica de $Bl(x)$ não gera quase nenhuma parte DC. No entanto, a indutância assimétrica $L_e(x)$, na Figura 51, gera uma parte DC negativa abaixo e acima de f_s . Em frequências muito baixas (10 Hz), a parte DC negativa da indutância reduz a parte DC positiva gerada pela suspensão. Em frequências mais altas (80 Hz), onde a corrente se torna alta novamente, mas o deslocamento é pequeno, a força de relutância domina o deslocamento DC total. O ponto zero ($X_{dc}=0$) em 50 Hz não é gerado por um $Bl(x)$ assimétrico, mas sim pela interação de duas não-linearidades assimétricas.

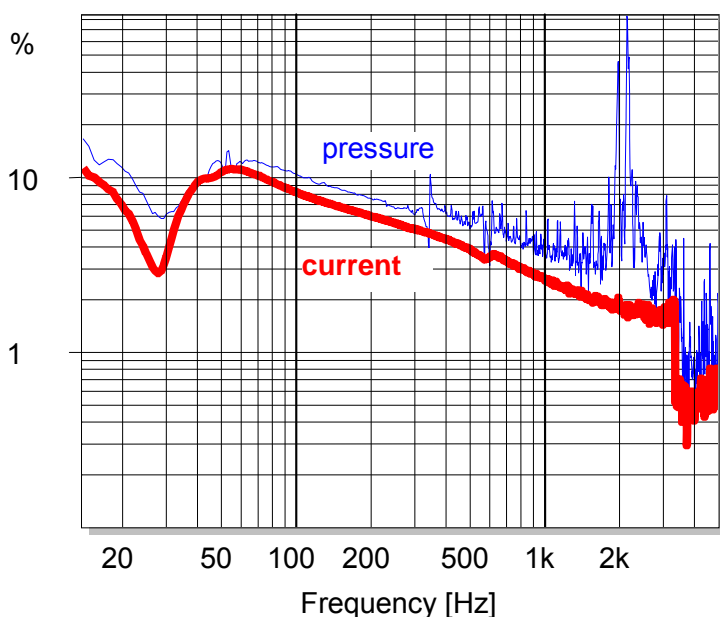


Figure 54: Equivalent total harmonic input distortion (*ETHD*) measured in the sound pressure output (thin curve) and in the voice coil current (thick curve) of loudspeaker 3

Figura 54: Distorção harmônica de entrada equivalente total (*ETHD*), medida na saída de pressão sonora (curva fina) e na corrente da bobina móvel (curva grossa) do alto-falante 3

The total harmonic distortion measured in sound pressure output and current input are presented as equivalent input distortion *ETHD* in Figure 54. The high inductance nonlinearity $L_e(i)$ generates high distortion in the input current (10% at 50 Hz) which dominates the sound pressure output. At 2 kHz the cone exhibits nonlinear vibration but this frequency is far beyond the intended working range of the automotive subwoofer.

A distorção harmônica total medida na saída da pressão sonora e na corrente de entrada são apresentados como uma distorção equivalente de entrada *ETHD* na Figura 54. A acentuada não-linearidade da indutância $L_e(i)$, gera alta distorção na corrente de entrada (10% a 50 Hz) que

domina a saída da pressão sonora. Em 2 kHz o cone apresenta vibração não-linear, porém esta frequência está muito além do alcance previsto do *subwoofer* automotivo.

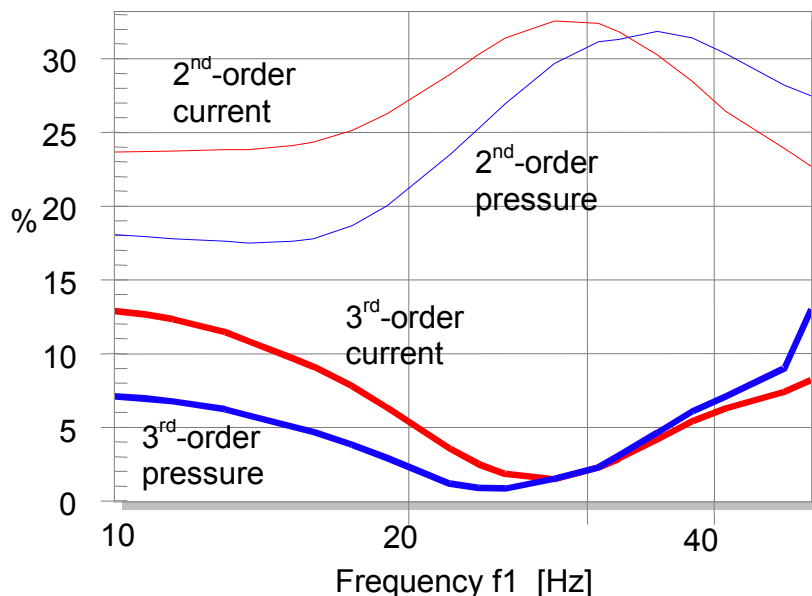


Figure 55: 2nd-order and 3rd-order intermodulation *IMD* in measured in voice coil current and sound pressure output of loudspeaker 3 (varied bass tone, $f_2=300$ Hz)

Figura 55: 2^a e 3^a ordem da intermodulação *IMD* medida na corrente da bobina móvel e na saída da pressão sonora do alto-falante 3 (variando tom grave, $f_2=300$ Hz)

The intermodulation between a variable frequency bass tone at f_1 and the fixed voice tone at frequency $f_2=300$ Hz is shown in Figure 55. Like the harmonic distortion, the intermodulation in the current and sound pressure output is of the same order of magnitude. According to Table 3 this is a characteristic symptom of both inductance nonlinearities $L_e(x)$ and $L_e(i)$. The 2nd-order intermodulation IMD_2 has a maximum at the resonance frequency which is typical for $L_e(x)$ -nonlinearity varying with displacement. The 3rd-order distortion IMD_3 has a dip at the resonance frequency f_s which is the characteristic symptom for the $L_e(i)$ -nonlinearity because the current becomes minimal there.

A intermodulação entre um tom de frequência baixa variável em f_1 e o tom de voz fixo na frequência $f_2=300$ Hz é mostrado na Figura 55. Como a distorção harmônica, a intermodulação na corrente e na saída da pressão sonora são da mesma ordem de magnitude. De acordo com a Tabela 3, este é um sintoma característico de ambas não-linearidades de indutância, $L_e(x)$ e $L_e(i)$. A intermodulação de 2^a ordem, IMD_2 , tem um máximo na frequência de ressonância que é típico para a não-linearidade de $L_e(x)$, variando com o deslocamento. A distorção de terceira ordem IMD_3 tem uma queda na frequência de ressonância f_s , sintoma característico para a não-linearidade de $L_e(i)$, já que a corrente torna-se mínima lá.

Loudspeaker 3 is an example of a speaker which is optimized for linear $Bl(x)$ and $K_{ms}(x)$ characteristic by using a long voice coil, a carefully designed magnetic path and a two-spider suspension. Despite the development effort, final cost and weight of the product the driver produces a highly distorted output due to the neglected $L_e(x)$ and $L_e(i)$ -nonlinearities. Applying some means for shorting the ac-field can improve loudspeaker 3 significantly.

O alto-falante 3 é um exemplo de um falante que é otimizado para a característica linear de $Bl(x)$ e $K_{ms}(x)$ utilizando uma bobina móvel grande, um caminho magnético cuidadosamente projetado e uma suspensão de duas aranhas. Apesar do esforço de desenvolvimento, do custo final e do peso do produto, o *driver* produz uma saída altamente distorcida devido às não-linearidades desprezadas de $L_e(x)$ e $L_e(i)$. Aplicando-se alguns meios para o curto-circuito, é possível melhorar significativamente o campo AC do alto-falante 3.

8. CONCLUSION CONCLUSÃO

In the last 20 years significant progress has been made in understanding the large signal behavior of loudspeakers.

Nos últimos 20 anos houve um progresso significativo no entendimento do comportamento dos alto-falantes de sinais de grande amplitudes.

Reliable models have been developed for displacement and current varying nonlinearities in the motor and suspension system. The nonlinear parameters $Bl(x)$, $L_e(x)$, $K_{ms}(x)$ and $L_e(i)$ can be measured dynamically on loudspeakers, headphones, micro-speakers and other transducers, with and without enclosure. Finite element analysis (FEA) can also be used to simulate those parameters from geometry and material parameters. The large signal model and the identified parameters allow numerical prediction of the nonlinear symptoms with high precision.

Modelos confiáveis tem sido desenvolvidos para a não-linearidade do deslocamento e da corrente no sistema de motor e suspensão. Os parâmetros não-lineares $Bl(x)$, $L_e(x)$, $K_{ms}(x)$ e $L_e(i)$, podem ser medidos dinamicamente em alto-falantes, fone de ouvidos, *micro-speakers* e outros transdutores, com ou sem gabinete. A análise de elementos finitos (FEA) também pode ser utilizada para simular esses parâmetros, a partir de parâmetros da geometria e do material. O modelo de grandes sinais e os parâmetros identificados, permitem a previsão numérica, com alta precisão, dos sintomas não-lineares.

This opens the way for a new kind of loudspeaker diagnostic:

Isto abre caminho para um novo método de diagnóstico de alto-falante, no qual:

- The nonlinear parameters are easy to interpret and reveal the physical causes almost directly.
- The effect of each nonlinearity can be investigated separately and the causes for signal distortion, instabilities, compression and other nonlinear symptoms can be found.

- Design choices can easily be evaluated and the loudspeaker optimized with respect to size, weight, cost and performance
- Os parâmetros não-lineares são fáceis de interpretar e revelam as causas físicas quase que diretamente.
- O efeito de cada não-linearidade pode ser analisado separadamente e as causas de distorção do sinal, instabilidades, compressão e outros sintomas de não-linearidade podem ser encontrados.
- Cada projeto pode ser facilmente avaliado e o alto-falante pode ser otimizado, com relação ao tamanho, peso, custo e desempenho.

The knowledge from theory and practical application gives new insight into the general distortion measurements and shows how to make such measurements more comprehensive, time-effective, critical and easier to interpret. The most important points are:

O conhecimento da teoria e da aplicação prática ampliam a visão sobre as medidas de distorção em geral e mostram como fazer medições de forma mais abrangente, em tempo eficaz, crítico e através de uma fácil interpretação. Os pontos mais importantes são:

- Nonlinear distortion measurements should be performed at different amplitude levels.
- As medições das distorções não-lineares devem ser apresentadas em diferentes níveis de amplitude.
- Harmonic distortion measurements assess particular symptoms (HD_n , THD, EID, ICHD, ...) of the loudspeaker. However, using a single tone as stimulus is not sufficient to describe the large signal performance comprehensively and to identify all loudspeaker nonlinearities.
- As medições de distorção harmônica avaliam os sintomas particulares (HD_N , THD, EID, ICHD, ...) do alto-falante, no entanto, usando um estímulo de único tom não é suficiente para descrever o desempenho do sinal de grande amplitude e identificar todas as não-linearidades do alto-falante.
- The stimulus should contain at least two tones at the same time to measure intermodulation distortion products which are generated by the multiplication of two different state signals (e.g. displacement and current). The frequency of the tones and the sweeping techniques are critical to get results which are easy to explain. The paper suggests two techniques (sweeping the bass or the voice tone while keeping the other tone at a constant frequency).
- Os estímulos devem conter pelo menos dois tons ao mesmo tempo, para medir os produtos da distorção de intermodulação, que são gerados pela multiplicação de dois

sinais de estados diferentes (por exemplo, deslocamento e corrente). A frequência dos tons e as técnicas de varredura são fundamentais para obter resultados de fácil explicação. O artigo sugere duas técnicas (varredura de baixo tom ou o tom de voz, mantendo o outro tom em uma frequência constante).

- The dc-displacement is a very informative symptom. It gives unique clues to identify the particular causes and to estimate the asymmetry of motor and suspension nonlinearities.
- O deslocamento DC é um sintoma bastante informativo. Através dele pode-se conseguir informações importantes para a identificação de causas particulares e para estimar a assimetria das não-linearidades do motor e da suspensão.
- The amplitude compression of the fundamental and distortion components is also a symptom of loudspeaker nonlinearities. However, it gives no detailed information as to the physical cause.
- A compressão em amplitude das componentes fundamentais e da distorção são também um sintoma da não linearidade do alto-falante. Entretanto, não são dadas informações sobre as causas físicas.
- The calculation of
- Input Distortion (EID) is a very useful way of post-processing the measured distortion. It suppresses the influence of the linear transfer path (mechanical vibration, radiation, propagation, room, sensor) and simplifies the interpretation of the distortion responses. In this way distortion measured in displacement, current and sound pressure can easily be compared. This gives valuable clues for separating motor- and cone nonlinearities.
- O cálculo da Distorção Equivalente de Entrada (EID) é uma maneira muito útil de pós-processamento da distorção medida. Ele suprime a influência do caminho de transferência linear (vibração mecânica, radiação, propagação, sala, sensor...) e simplifica a interpretação das respostas de distorção. Desta forma a distorção medida em deslocamento, corrente e pressão sonora podem ser facilmente comparadas. Isso gera informações importantes para a separação da não-linearidade do motor e do cone.
- Measurements of the distortion in the sound pressure output should be performed in the near field of the loudspeaker where the signal-to-noise ratio is high. After calculating the equivalent input distortion the distortion at any point in the sound field can easily be predicted by using the linear transfer function measured at lower amplitudes.
- As medições da distorção na saída da pressão sonora devem ser realizada no campo próximo do alto-falante, onde a relação sinal-ruído é alta. Depois de calcular a distorção equivalente de entrada, a distorção em qualquer ponto do campo de som pode ser

facilmente prevista utilizando a função de transferência linear medida em baixas amplitudes.

- The distortion in the input current gives valuable information about the motor nonlinearities.
- A distorção na corrente de entrada fornece informações importantes sobre as não-linearidades do motor.
- The crest factor of harmonic distortion (*ICHD*) describes the smoothness of the nonlinearity. It exploits the phase information of higher-order harmonics and indicates transient, impulsive distortion caused by loudspeaker defects (e.g. *rub & buzz*) or extremely hard limiting nonlinearities.
- O fator de crista de distorção harmônica (*ICHD*) descreve a suavidade da não-linearidade, explora a informação de fase dos harmônicos de ordem superior e indica a distorção transitória e impulsiva causadas por defeitos do alto-falante (por exemplo, *rub & buzz*) ou por não-linearidades extremamente acentuadas.

These conclusions lead to a suite of objective measurements which can be accomplished in a few minutes. These measurements give a much more comprehensive picture of the large signal performance than a traditional harmonic distortion measurement. The results can be summarized in a small set of data which is easy to interpret as demonstrated on three loudspeaker examples in this paper. Tables 1 - 5, give a short summary on the dominant nonlinearities and characteristic symptoms which may be helpful to apply this knowledge in daily work.

Estas conclusões levam a um conjunto de medidas objetivas que podem ser realizadas em poucos minutos. Estas medidas permitem uma visão muito mais abrangente do desempenho de grandes sinais do que uma medição de distorção harmônica tradicional. Os resultados podem ser resumidos em um pequeno conjunto de dados de simples interpretação, como demonstrado em três exemplos de alto-falante neste trabalho. As Tabelas 1-5, discorrem sobre as não-linearidades dominantes e os sintomas característicos, que podem ser úteis para uma aplicação frequente no trabalho.

9. REFERENCES REFERÊNCIAS

[1] A. J. M. Kaizer, "Modeling of the Nonlinear Response of an Electrodynamics Loudspeaker by a Volterra Series Expansion," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 35, pp. 421-433 (1987 June).

[2] J. Vanderkooy, "A Model of Loudspeaker Driver Impedance Incorporating Eddy Currents in the Pole Structure," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 37, No. 3, pp. 119-128, March 1989.

- [3] W. M. Leach, "Loudspeaker Voice-Coil Inductance Losses: Circuit Models, Parameter Estimation, and Effect on Frequency Response," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 50, No. 6, pp. 442-450, June 2002.
- [4] J.R. Wright, "An Empirical Model for Loudspeaker Motor Impedance," *J. Audio Eng. Soc.* Vol. 38, No. 10, pp. 749-754, October 1990.
- [5] M. Dodd, et. al., "Voice Coil Impedance as a Function of Frequency and Displacement" presented at the 117th Convention of the Audio Eng. Soc. , 2004 October 28–31, San Francisco, CA, USA.
- [6] A. Chaigne, "Influence of Material and Shape on Sound Reproduction by an Electrodynamic Loudspeaker," presented at the 118th Convention of the Audio Eng. Soc. , 2005 May 28–31, Barcelona, Spain, preprint 6420.
- [7] O. Thomas, "Analyse et modelisation de vibrations non-lineaires de milieux minces elastiques," These of UPMC (Paris 6), (2001 October).
- [8] J. Vanderkooy, "Nonlinearities in Loudspeaker Ports," presented at the 104th Convention of the Audio Eng. Soc., 1998 May 16 – 19, Amsterdam, NL, preprint 4748.
- [9] N.B. Roozen, "Reduction of Bass-Reflex Port Nonlinearities by Optimizing the Port Geometry," presented at the 104th Convention of the Audio Eng. Soc., 1998 May 16 – 19, Amsterdam, NL, preprint 4661.
- [10] P. Merkli, et. al., "Transition to turbulence in oscillating pipe flow," *J. Fluid Mech.* 68 (3), 567 – 575 (1975).
- [11] B. Zoltogorski, "Moving Boundary Condition and Non-Linear Propagation as the Sources of Non-Linear Distortion in Loudspeaker," presented at the 94th Convention of the Audio Eng. Soc., 1993 March 16-19, Berlin Germany, preprint 3510.
- [12] H. J. Butterweck, "About the Doppler Effect in Acoustic Radiation from Loudspeakers," *Acustica* Vol. 63, pp. 77 –79, (1987).
- [13] L. J. Black, "A Physical Analysis of Distortion produced by the Nonlinearity of the Medium," *J. Acoust. Soc. Am.* 1, 266 – 267 (1940).
- [14] W. Klippel, "Nonlinear Wave Propagation in Horns and Ducts," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 98, No. 1 , 431 – 438 (July 1995).
- [15] E. Czerwinski, "Air-Related Harmonic and Intermodulation Distortion in Large Sound Systems," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 47, No. 6, pp. 427-446, June 1999.
- [16] W. Klippel, "Modeling the Nonlinearities in Horn Loudspeakers," *J. Audio Eng. Society*, vol. 44, pp. 470-480 (1996).

- [17] S. Temme, et. al., “Loose Particle Detection in Loudspeakers,” presented at the 115th Convention of the Audio Eng. Soc., September 2003, preprint 5883.
- [18] W. Klippel, et. al. , “Loudspeaker Testing at the Production Line,” presented at the 120th Convention of the Audio Eng. Soc., Paris (France), September 2006, May 20-23, preprint 6845.
- [19] “Sound System Equipment – Electroacoustical Transducers – Measurement of Large Signal Parameters,” IEC Publication PAS 62458 © IEC:2006(E).
- [20] D. Clark, "Precision Measurement of Loudspeaker Parameters," J. Audio Eng. Soc. vol. 45, pp. 129 – 140, (1997 March).
- [21] R. H. Small, “Assessment of Nonlinearity in Loudspeakers Motors,” in IREECON Int. Convention Digest (1979 Aug.), pp. 78-80.
- [22] W. Klippel, “Measurement of Large-Signal Parameters of Electrodynamical Transducer,” presented at the 107th Convention of the Audio Engineering Society, New York, September 24-27, 1999, preprint 5008.
- [23] M. Knudsen, et. al., “Determination of Loudspeaker Driver parameters Using a System Identification Technique,” ,” *J. Audio Eng. Soc.* vol. 37, No. 9.
- [24] M.H. Knudsen et. al., “Low-Frequency Loudspeaker Models that Include Suspension Creep,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 41, pp. 3-18, (Jan./Feb. 1993).
- [25] Specification of the KLIPPEL Analyzer System, Klippel GmbH, www.klippel.de, 2005.
- [26] W. Klippel, "Prediction of Speaker Performance at High Amplitudes," presented at 111th Convention of the Audio Engineering Society, 2001 September 21–24, New York, NY, USA.
- [27] W. Klippel, "Speaker Auralization – Subjective Evaluation of Nonlinear Distortion," presented at the 110th Convention of the Audio Engineering Society, Amsterdam, May 12-15, 2001, preprint 5310, J. Audio Eng. Society, Vol. 49, No. 6, 2001 June, P. 526.
- [28] A. Voishvillo, “Graphing, Interpretation, and Comparison of Results of Loudspeaker Nonlinear Distortion Measurements,” J. Audio Eng. Society, Volume 52, Number 4, pp. 332-357, April 2004.
- [29] A. Dobrucki, “Nontypical Effects in an Electrodynamical Loudspeaker with a Nonhomogeneous Magnetic Field in the Air Gap and Nonlinear Suspension,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 42, pp. 565 - 576, (July./Aug. 1994).

- [30] J.W. Noris, “Nonlinear Dynamical Behavior of a Moving Voice Coil,” presented at the 105th Convention of the Audio Engineering Society, San Francisco, September 26-29, 1998, preprint 4785.
- [31] “Sound System Equipment. Part 5: Loudspeakers,” IEC Publication 60268-5.
- [32] S. F. Temme, “How to Graph Distortion Measurements,” presented at the 94th Convention of Audio Eng. Soc. , 1993 March 16-19, Berlin, preprint 3602.
- [33] W. Klippel, “Equivalent Input Distortion,” *J. Audio Eng. Society* **52**, No. 9 pp. 931-947 (2004 Sept.).
- [34] W. Klippel, „Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and other Disturbances”, presented at the 114th Convention of the Audio Engineering Society, 2003 March 22–25, Amsterdam, The Netherlands, preprint # 5734.
- [35] D. Clark, “Amplitude Modulation Method for Measuring Linear Excursion of Loudspeakers,” presented at the 89th Convention of the Audio Eng. Soc., *J. Audio Eng. Soc. (Abstracts)*, vol. 38, p. 874 (1990 Nov.), preprint 2986.
- [36] R. H. Small, “Measurement of Loudspeaker Amplitude Modulation Distortion,” presented at the 114th Convention of the Audio Eng. Soc. in Amsterdam, March 22 – 25, 2003, preprint 5731.
- [37] W. Klippel, “Nonlinear Large-Signal Behavior of Electrodynamic Loudspeakers at Low Frequencies,” *J. Audio Eng. Soc.* , vol. 40, pp. 483-496 (1992).
- [38] E. Czerwinski, et. al., "Multitone Testing of Sound System Components – Some Results and Conclusions, *J. Audio Eng. Soc.* vol. 49, pp. 1011 - 1048 (2001 Nov.).
- [39] W. Klippel, “Assessment of Voice-Coil Peak Displacement X_{max} ,” *J. Audio Eng. Society* **51**, vol. 5, pp. 307 - 323 (2003 May).

Translated by Thais De Fusco