

Loudspeaker End-of-line Testing

Teste fim de linha de produção do alto-falante

Wolfgang Klippel
Dresden University of Technology
Germany

1 Introduction Introdução

Testing a manufactured unit at the end of the assembly line is a critical step in the production process. Defective products or even those not matching specification limits closely enough must be separated from the functional units shipped to the customer. End-of-line testing assesses not only the quality of the product, but also the stability and yield of the production process. Reliable detection of non-functional units is the primary objective of the test, but reducing the rejection rate and maximizing the output is the ultimate goal.

100% automatic testing replaces more and more subjective testing by human operators to shorten the production cycle and to improve the reproducibility and comparability of the results. However, objective measurements should provide a comprehensive assessment as sensitive as a human tester using his visual and aural senses. To fully compete with an experienced operator, the objective measurement instrument should also have learning capabilities to accumulate knowledge about physical causes of the fault. Furthermore it should be capable of being integrated in automated lines, robust in a harsh and noisy environment, cost effective and simple to use.

O teste de uma unidade fabricada no final da linha de montagem é um passo crítico no processo de produção. Produtos defeituosos ou mesmo aqueles que não atingem os limites de especificação devem ser separados das unidades funcionais enviadas para o cliente. Os testes fim-de-linha avaliam não só a qualidade do produto, mas também a estabilidade e o rendimento do processo de produção. Seu principal objetivo é obter uma detecção confiável de unidades não-funcionais, porém o objetivo final é reduzir a taxa de rejeição e maximizar a produção.

Testes 100% automáticos substituem cada vez mais testes subjetivos por operadores humanos a fim de encurtar o ciclo de produção e melhorar a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados. Entretanto, medições objetivas devem fornecer uma avaliação compreensiva tão sensível quanto de um testador humano usando seus sentidos visuais e auditivos. Para concorrer plenamente com um operador experiente, o instrumento de medição objetiva também deve ter capacidade de aprendizagem para acumular conhecimento sobre as causas físicas da falha. Além disso, deverá ser capaz de ser integrado em linhas automatizadas, ser robusto em um ambiente hostil e barulhento, ter baixo custo e ser de simples utilização.

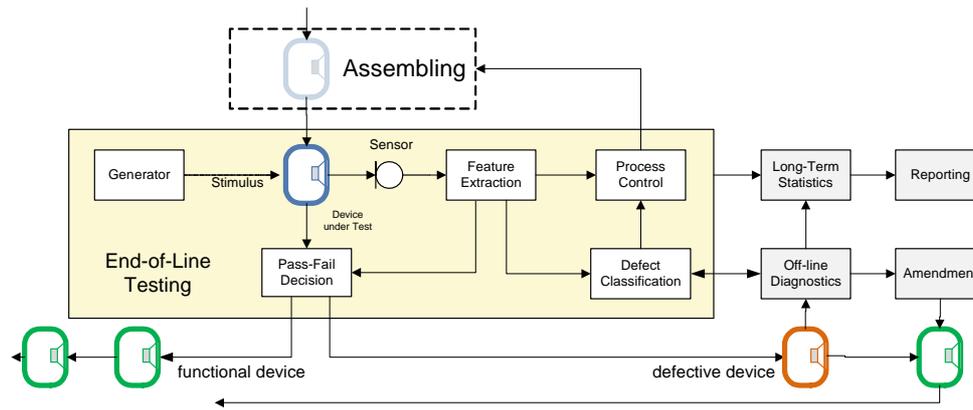


Fig. 1. Quality control at the end of the assembly line

Fig.1. Controle de qualidade no fim da linha de montagem

Modern end-of-line testing (EOL) which satisfies those requirements is a complex process, as illustrated in Fig. 1. This chapter can only give a general overview on essential components, their interactions and future trends. Fig. 1 provides a roadmap of the discussion, starting with the physical modelling of the device under test in section 2. This is the basis for ultra-fast testing, providing meaningful symptoms of the defect at high sensitivity. Important issues of the measurement will also be considered in section 3, such as the generation of a critical stimulus, the influence of the test conditions and the selection of optimal sensors. The following section 4 describes relevant features extracted by signal analysis, system identification and other kinds of transformations suppressing noise and redundant information. The Pass/Fail decision and classification of faults is the subject of section 5 and considers the problem of defining specification limits, grading the quality of the device and revealing the initial cause of the problem. The measurement results produced by end-of-line testing require a special data management and statistical analysis to support documentation, customer report and process control. The new requirements and technical possibilities in modern end-of-line testing put the future role of the human operator into question.

Testes modernos de fim de linha (EOL) que satisfazem esses requisitos são complexos, como ilustrado na Fig. 1. Este capítulo dá apenas uma visão geral sobre os componentes essenciais, suas interações e tendências futuras. A Fig. 1 fornece um roteiro da discussão, a partir da modelagem física do dispositivo em teste na seção 2. Esta é a base para o teste ultra-rápido, proporcionando sintomas significativos do defeito com alta sensibilidade. Questões importantes de medição também serão consideradas na seção 3, tais como a geração de um estímulo fundamental, a influência das condições de teste e a seleção de sensores ideais. A seção seguinte descreve características relevantes extraídas por análise de sinais, identificação de sistemas e outros tipos de transformações que anulam as informações de ruído e redundância. A decisão de *Pass/Fail* e a classificação de falhas é o assunto da seção 5 e considera o problema da definição dos limites de especificação,

classificação da qualidade do dispositivo e revela a causa inicial do problema. Os resultados das medições produzidos por um teste fim-de-linha requerem um gerenciamento de dados especiais e uma análise estatística de apoio à documentação ao relatório de clientes e ao controle de processos. As novas exigências e possibilidades técnicas em testes fim de linha modernos colocam o papel futuro do operador humano em questão.

The discussion uses mass produced loudspeakers found in cellular phones, cars, multimedia, home entertainment and professional applications as a practical example. Some loudspeaker defects have a high impact on the perceived sound quality and will not be accepted by the customer. The loudspeaker example also represents other electrical, mechanical or acoustical systems manufactured at high quantities and low costs at a modern assembly line.

A discussão utiliza alto-falantes produzidos em massa, encontrados em telefones celulares, carros, multimídia, entretenimento e aplicativos profissionais como um exemplo prático. Alguns defeitos do alto-falante tem um alto impacto sobre a qualidade do som percebido e não será aceito pelo cliente. O exemplo de alto-falante também representa outros sistemas elétricos, mecânicos ou acústicos fabricados em quantidades elevadas e com baixos custos em uma linha de montagem moderna.

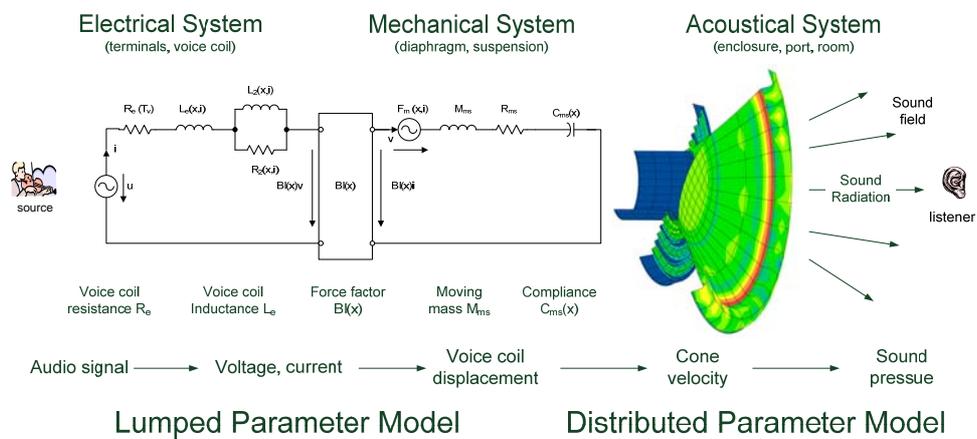


Fig. 2. Electro-dynamical loudspeakers modelled by lumped and distributed parameters

Fig.2. Alto-falantes eletro-dinâmicos modelados por parâmetros concentrados e distribuídos

2 Physical Modelling Modelagem física

A clear definition of the relevant properties and features of the device under test is essential for the end-of-line test to determine overall quality, perform fast measurements producing meaningful data and arrive at a correct Pass/Fail decision.

Uma boa definição das propriedades relevantes e das características do dispositivo em teste é essencial para o teste fim de linha determinar a qualidade global, realizar medições rápidas produzindo dados significativos e chegar a uma decisão *Pass/Fail* correta.

2.1 Product in the Development Process Produto no processo de desenvolvimento

The models used in the design and development process are reliable sources of this information. For example the transfer behaviour of loudspeakers can be described by two kinds of models as shown in Fig. 2.

Os modelos utilizados no processo de projeto e desenvolvimento são fontes de informações confiáveis. Por exemplo, o comportamento de transferência de alto-falantes pode ser descrito por dois tipos de modelos, como mostrado na Fig. 2.

The first model uses a small number of lumped elements representing the electrical resistance R_e , inductance L_e of the voice coil wire, force factor $Bl(x)$ – one of the most important transducer characteristics – and other mechanical parameters such as the total moving mass M_{ms} and the compliance C_{ms} of the mechanical suspension. Those lumped parameters play an important role for the quality check of loudspeakers and can be easily identified from the electrical current i , voltage u and the mechanical displacement x . A second model is used to describe the generation of mechanical modes and acoustical waves using parameters distributed over the diaphragm and the sound field. Since the velocity and sound pressure may vary from point to point, it is impossible to measure the state of all those points on the radiator's surface and in the sound field during end-of-line testing.

O primeiro modelo utiliza um pequeno número de elementos concentrados, representando a resistência elétrica R_e , a indutância L_e da bobina móvel, o fator força $Bl(x)$ – uma das características mais importantes dos transdutores – e outros parâmetros mecânicos como a massa total em movimento M_{ms} e a compliância C_{ms} da suspensão mecânica. Estes parâmetros concentrados possuem um papel importante para checar a qualidade do alto-falante e podem ser facilmente identificados a partir da corrente elétrica i , da tensão u e do deslocamento mecânico x . Um segundo modelo é usado para descrever os modos de geração mecânica e ondas acústicas, usando parâmetros distribuídos sobre o diafragma e o campo de som. Como a velocidade e a pressão sonora podem variar em cada ponto, é possível medir o estado de todos os pontos na superfície do radiador e no campo de som durante o teste fim de linha.

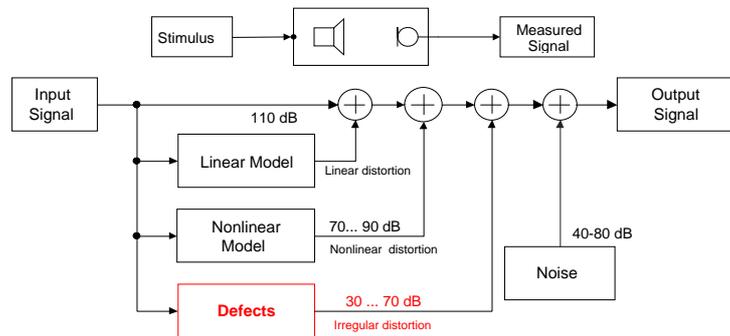


Fig. 3. Signal flow diagram showing the generation of signal distortion in a loudspeaker system

Fig. 3. Diagrama de fluxo do sinal mostrando a geração de distorção do sinal em um sistema de alto-falante

A more abstract model depicted in Fig. 3 shows the signal flow between the signal source and the sensor output, and the generation of the following distortion components in the output signal:

Um modelo mais abstrato, apresentado na Fig. 3, mostra o fluxo de sinal entre a fonte do sinal e a saída do sensor e a geração das componentes de distorção seguintes na saída do sinal.

Linear distortions are generated by the transfer response which varies in amplitude and phase with frequency. This kind of signal distortion is independent of the amplitude of the stimulus and describes the small signal behaviour of loudspeakers. At higher amplitudes *non-linear distortions* are generated. These comprise new spectral components at multiples and combinations of the excitation frequencies. Measurement techniques assessing harmonic and intermodulation components exploit this property and play an important role in loudspeaker testing. All loudspeakers generate linear and non-linear signal distortions to a certain extent, depending on the physical limits of the electro-mechanical transducer. Those distortions are deterministic and can be predicted by numerical design tools (Klippel, 2006). The prototype at the end of the design process is a compromise between sound quality, maximal acoustical output, efficiency, size, cost and weight depending on the particular application. Those distortions are considered as regular and should be a feature of all replicated units passing the end-of-line test. Excessive signal distortions found in manufacturing are considered as *irregular distortion* and indicate a loudspeaker defect.

As distorções lineares são geradas por uma resposta de transferência que varia a frequência em amplitude e em fase. Este tipo de distorção de sinal é independente da amplitude e do estímulo e descreve o comportamento de um sinal pequeno do alto-falante. Em maiores amplitudes são geradas distorções não-lineares, as quais compreendem novas componentes espectrais em múltiplas combinações das frequências de excitação. As técnicas de medição que avaliam as componentes harmônicas e de intermodulação, exploram esta propriedade e têm grande importância no teste do alto-falante. Todos alto-falantes geram distorções lineares e não-lineares do sinal em certa medida, dependendo do limite físico do transdutor eletro-mecânico. Estas distorções são deterministas e podem ser previstas através de ferramentas numéricas de projeto (Klippel, 2006). O prototipo no fim do processo de projeto é um compromisso entre a qualidade sonora, a saída acústica máxima, a eficiência, o tamanho, o custo e o peso, dependendo de cada aplicação. Estas distorções são consideradas regulares e devem ser uma característica de todas unidades replicadas passadas no teste final. Distorções excessivas do sinal encontrado na fabricação são considerados como distorção irregular e indicam um alto-falante defeituoso.

Ambient noise as found in a real production environment is also monitored by the test microphone and will corrupt the measurement. Those signal components differ in the sound pressure level significantly as shown in Fig. 3. Irregular distortion generated by a rubbing voice coil and other loudspeaker defects may be more than 60 dB below the total signal level and will still be detected by a human ear in the final application.

O ruído ambiente, como encontrado no ambiente de produção real, também é monitorado por um microfone e irá corromper a medição. Essas componentes de sinal alteram significativamente o nível de pressão sonora, de acordo com a Fig. 3. As distorções irregulares geradas pelo atrito da bobina móvel e por outros defeitos do alto-falante devem

estar a pelo menos 60 dB abaixo do nível total do sinal e mesmo assim ainda será detectado pelo ouvido na aplicação final.

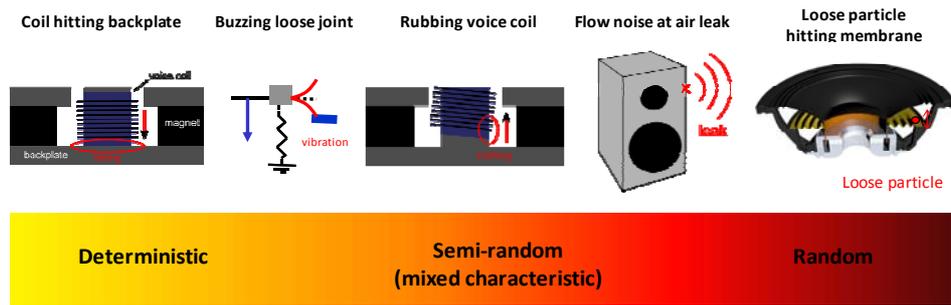


Fig. 4. Critical loudspeaker defects caused by manufacturing

Fig. 4. Defeitos críticos do alto-falante causados pela fabricação

2.2 Product in Manufacturing Produto na fabricação

The variation in the linear and non-linear parameters provided by the physical models may be used for detecting defective units. For example, an increase of the moving mass (e.g., too much glue) or a decrease of the force factor (e.g., insufficient magnetization) reduces the sound pressure output of loudspeakers at higher frequencies. The relationship between causes and symptoms becomes more complex when initial and consecutive faults occur. For example, asymmetrical loudspeaker nonlinearities generate a dc displacement which moves the coil away from the rest position. This can cause audible distortion when the voice coil hits back-plate as shown on the left-hand side of Fig. 4. Other defects are hardly predictable, such as a poorly glued connection between the surround and the membrane behaving as an independent oscillator creating a buzzing sound. The spring-mass system performs an undesired mode of vibration at higher frequencies which is powered, triggered and synchronized by the stimulus. The faulty glue joint behaves here as a nonlinear switch activating the resonator above a critical amplitude. The beating of the braid wire on the loudspeaker diaphragm is a similar defect generating impulses at a particular position of the voice coil. The energy of those impulsive distortions is usually small and does not grow significantly with the level of the stimulus. A coil rubbing at the pole tips is a typical fault found in the production of loudspeakers generating impulsive distortion which contains deterministic and random components (Klippel, 2003). Air leaks in dust caps or in sealed enclosures emit a small air flow driven by the ac sound pressure inside the box which generates air turbulences and random noise (Klippel, 2010). Some loudspeakers defects behave randomly. For example, dust in the magnetic gap or below the dust cap in loudspeakers are accelerated by the cone displacement and hit the diaphragm at unpredictable times.

A variação dos parâmetros lineares e não-lineares fornecidos pelos modelos físicos deve ser usada para detectar unidades defeituosas, por exemplo, um aumento da massa em movimento (muita cola) ou uma diminuição do fator força (magnetização insuficiente) reduz a saída da pressão sonora de alto-falantes em frequências mais altas. A relação entre

as causas e os sintomas torna-se mais complexa quando ocorrem erros iniciais e consecutivos. Por exemplo, as não-linearidades assimétricas do alto-falante geram um deslocamento DC que movimenta a bobina para fora da posição de repouso. Isto pode causar uma distorção audível quando a bobina móvel bate na placa traseira, como mostrado no lado esquerdo da Fig. 4. Outros defeitos são dificilmente previsíveis, tais como, uma falta de cola na conexão entre a borda e a membrana, comportando-se como um oscilador independente e gerando zumbido. O sistema massa-mola gera um modo de vibração indesejado em altas frequências, o qual é potente, desencadeado e sincronizado com o estímulo. A falta de cola na junção comporta-se neste caso como uma chave não linear que ativa o ressonador acima de uma amplitude fundamental. A batida do fio trançado no diafragma do alto-falante é um defeito similar que gera impulsos em certas posições da bobina móvel. A energia dessas distorções impulsivas são geralmente pequenas e não crescem significativamente com o nível do estímulo. Uma bobina raspando nas extremidades do pólo é uma falha típica encontrada na produção de alto-falantes, que gera distorções impulsivas, que podem ser deterministas e aleatórias (Klippel, 2003). Um vazamento de ar nas capas de proteção ou em gabinetes fechados emitem um pequeno fluxo de ar dirigido pela pressão sonora dentro da caixa, gerando uma turbulência de ar e um ruído aleatório (Klippel, 2010). Alguns defeitos de alto-falantes comportam-se aleatoriamente, por exemplo, pó no *gap* magnético ou abaixo da capa de proteção do alto-falante são acelerados pelo deslocamento do cone e batem no diafragma em momentos não previsíveis.

Although some irregular loudspeaker defects produce symptoms which are not predictable and cannot be modelled completely, it is still beneficial to investigate the physics of those defects and to develop sensitive measurement techniques exploiting particular features of those symptoms. Fig. 5 illustrates this approach using the example of air noise generated by a small leak at the rear of a loudspeaker enclosure. The random noise is generated by turbulences due to the high velocity of the air at the exit of the leak. However, the air volume velocity $q(t)$ is not constant, but a function of the sound pressure $p_{\text{box}}(t)$ in the enclosure and the voice coil displacement $x(t)$. The flow diagram on the right-hand side describes the generation by using a linear system $H_{\text{pre}}(j\omega)$ generating the sound pressure signal p_{box} , a nonlinear modulation process and a second linear system $H_{\text{post}}(j\omega)$ describing the propagation of the generated noise to any point r_a in the sound field. Information from the physical modelling provides the basis for a new demodulation technique for detecting air leaks more sensitive and reliable than the human ear.

Apesar de alguns defeitos irregulares do alto-falante produzirem sintomas que não são previsíveis e não podem ser totalmente modelados, ainda são úteis para analisar a física desses defeitos e desenvolver técnicas de medição sensíveis, explorando características particulares desses sintomas. A Fig. 5 ilustra esta abordagem utilizando o exemplo de ruído do ar gerado por um pequeno vazamento da parte traseira de um gabinete de alto-falante. O ruído aleatório é gerado por turbulências devido à velocidade do ar na saída do vazamento. Apesar da velocidade do volume de ar $q(t)$ não ser constante, está em função da pressão sonora $p_{\text{box}}(t)$ no gabinete e do deslocamento $x(t)$ da bobina móvel. O diagrama de fluxo no lado direito descreve a geração através de um sistema linear $H_{\text{pre}}(j\omega)$ gerando o sinal de pressão sonora p_{box} , um processo de modulação não linear e um segundo sistema linear $H_{\text{post}}(j\omega)$, descrevendo a propagação do ruído gerado em qualquer ponto r_a no campo de

som. As informações a partir da modelagem física fornecem a base para uma nova técnica de demodulação para uma detecção de vazamentos de ar mais sensível e confiável do que o ouvido humano.

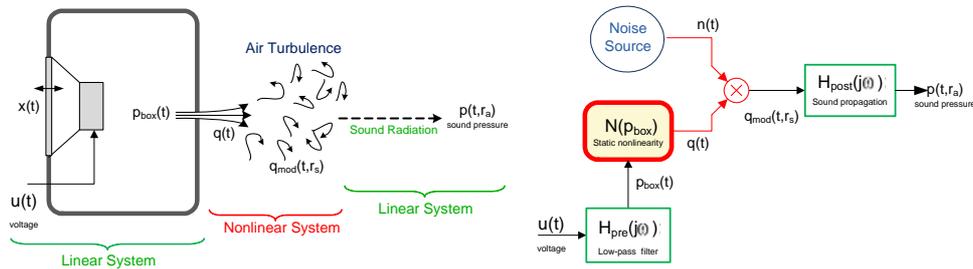


Fig. 5. Generation of turbulent air noise by a leaky loudspeaker enclosure

Fig. 5. Geração do ruído da turbulência de ar devido ao vazamento do gabinete do alto-falante

3 Measurement Medição

This chapter discusses the theoretical and practical aspects of performing the basic measurements, considering the measurement condition, excitation of the device under test and using optimal sensors to monitor relevant state variables.

Este capítulo discorre sobre os aspectos teóricos e práticos da realização de medições básicas, considerando-se a condição de medição, excitação do dispositivo em teste e usando sensores ideais para monitorar variáveis de estado relevantes.

As expected from any other measurement process, the results of end-of-line testing should be repeatable under the same conditions, reproducible by a different operator at a different location using the same instrument, stable over time and free of bias. Repeatability and Reproducibility can be tested by a gauge R&R test which reveals undefined factors that increase the variability of the measurement process. For example, loudspeaker transducers have to be clamped in the same way and at the same distance from the microphone, and should not be varied from measurement to measurement. The stability over time may be affected by climate conditions such as temperature, humidity and static sound pressure which affect the speed of sound. A critical issue in end-of-line testing is the accuracy of the measurement process producing bias-free results which agree with the “true” values and are comparable with the results of other instruments. The sound field generated by loudspeakers, for example, is influenced by the properties of the acoustical environment such as waves reflected from the table, floor, ceiling and room modes. Measurements performed in an anechoic room which are indispensable in loudspeaker design are usually not practical and too expensive in manufacturing. Measurement in a normal production environment using a simple test box is preferred but requires a special calibration routine to ensure comparability with the results of measurements in research and development (R&D). Instead of assessing absolute characteristics which might be easily a subject of a bias, it is

more practical to use relative characteristics in end-of-line testing for defining the quality of the device under test. This subject will be discussed in the next chapter in greater detail.

Como esperado de qualquer processo de medição, os resultados do teste fim-de-linha de produção devem ser repetidos nas mesmas condições, ser reprodutíveis por um operador diferente em um local diferente usando o mesmo instrumento estável ao longo do tempo e sem tendência. Repetibilidade e reprodutibilidade podem ser testados por um teste de calibração R&R, o qual revela fatores indefinidos que aumentam a variabilidade do processo de medição. Por exemplo, os transdutores de alto-falante precisam ser fixados da mesma maneira e na mesma distância do microfone, e não devem ser variados de medição para a medição. A estabilidade ao longo do tempo pode ser afetada por condições climáticas como temperatura, umidade e pressão sonora estática que afetam a velocidade do som. Uma questão crítica no teste fim de linha é a precisão do processo de medição produzindo resultados sem tendência, que concordam com os "verdadeiros" valores e são comparáveis com os resultados de outros instrumentos. O campo sonoro gerado pelos alto-falantes, por exemplo, é influenciado pelas propriedades do ambiente acústico, como ondas refletidas na mesa, piso, teto e modos do quarto. Medições realizadas em uma sala anecóica, que são indispensáveis no projeto do alto-falante, normalmente não são práticas, além de serem muito caras na fabricação. A medição em um ambiente de produção normal, usando uma caixa de teste simples, é preferível, porém exige uma rotina de calibração especial para garantir a comparabilidade com os resultados de medições em pesquisa e desenvolvimento (R&D). Ao invés de avaliar as características absolutas, que podem ser facilmente objeto de uma tendência, é mais prático utilizar características relativas para definir a qualidade do dispositivo no teste fim de linha. Este assunto será discutido no próximo capítulo mais detalhadamente.

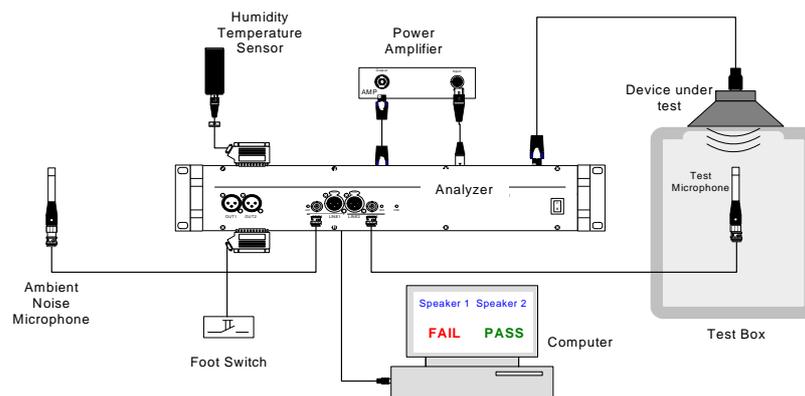


Fig. 6. Typical hardware setup for the end-of-line testing of loudspeakers

Fig. 6. *Setup* de um *hardware* típico para o teste fim de linha de alto-falantes

3.1 Test Environment Teste ambiente

Fig. 6 shows a simple and cost-effective hardware setup which complies with the requirements in the manufacturing of woofers, tweeters and other transducers used in audio

systems. It comprises a front-end generating the stimulus, microphones, a power amplifier, a PC for processing the data and auxiliaries integrating the instrument into the production line. The loudspeaker is clamped at a clearly defined position on a rigid test box unable to perform any parasitic vibrations. The microphone measures the sound pressure in the near field of the transducer at a fixed (local) position. The test box also provides some shielding against ambient noise generated in a real production environment. However, the enclosed air volume in the test box behaves as an additional air spring which reduces the displacement of the voice coil at lower frequencies. Although the interior of the loudspeaker box is damped by lining the inner walls with absorbing materials, the radiated sound pressure output is also affected by standing waves. Thus the acoustical measurements performed in the test box are only accurate for the particular measurement setup used at the end of the assembly line and are not directly comparable with the absolute measurements made under other measurement conditions during the design process. This discrepancy has an important consequence on defining permissible limit thresholds in the Pass/Fail detection discussed below.

A Fig. 6 mostra um *setup* de *hardware* simples e de baixo custo, em conformidade com os requisitos na fabricação de *woofers*, *tweeters* e outros transdutores utilizados em sistemas de áudio. Dispõe de um *front-end* gerando o estímulo, microfones, um amplificador de potência, um PC para processamento dos dados e auxiliaries integrando o instrumento na linha de produção. O alto-falante é fixado em uma posição claramente definida em uma caixa de teste rígida incapaz de realizar qualquer vibração parasita. O microfone mede a pressão sonora no campo próximo do transdutor em uma posição fixa (local). A caixa de teste também fornece alguma blindagem contra ruídos ambientes gerados em um ambiente de produção real. No entanto, o volume de ar fechado na caixa de teste comporta-se como uma mola de ar adicional que reduz o deslocamento da bobina móvel em frequências mais baixas. Embora o interior da caixa do alto-falante seja amortecido por revestimento interno nas paredes com materiais absorventes, a saída de pressão sonora radiada também é afetada por ondas estacionárias. Assim, as medições acústicas realizadas na caixa de teste só são precisas em um *setup* de medição específico usado no fim da linha de montagem e não são diretamente comparáveis com as medições absolutas feitas sob outras condições de medição durante o processo de projeto. Esta discrepância tem uma consequência importante na definição dos *thresholds* permitidos na detecção *Pass/Fail* discutidos abaixo.

The measurement setup shown in Fig. 6 uses additional sensors to monitor production noise, air temperature and humidity. This information is crucial for detecting invalid measurements corrupted by ambient noise and to ensure long-term stability under varying climate conditions.

O *setup* de medição, mostrado na Fig. 6., usa sensores adicionais para monitorar a produção de ruído, a temperatura do ar e a humidade. Esta informação é crucial na detecção de medições inválidas corrompidas pelo ruído ambiente e na fixação da estabilidade sob variações climáticas a longo prazo.

3.2 Stimulus and Excitation Estímulo e excitação

Most defects only produce significant symptoms if the device under test is operated in a critical state. An optimal excitation requires sufficient energy (e.g., ac main power) or a

particular stimulus (e.g., analogue or digital signal). Ensuring sufficient excitation within the shortest time possible leads to ultra-fast testing which will be discussed in greater detail:

A maioria dos defeitos produzem apenas sintomas significativos se o dispositivo em teste for operado no estado crítico. Uma excitação ideal requer energia suficiente (por exemplo, alimentação AC principal) ou um estímulo particular (por exemplo, sinal analógico ou digital). Com uma excitação suficiente dentro do prazo mais curto possível, dirigi-se para o teste ultra-rápido, que será discutido mais detalhadamente.

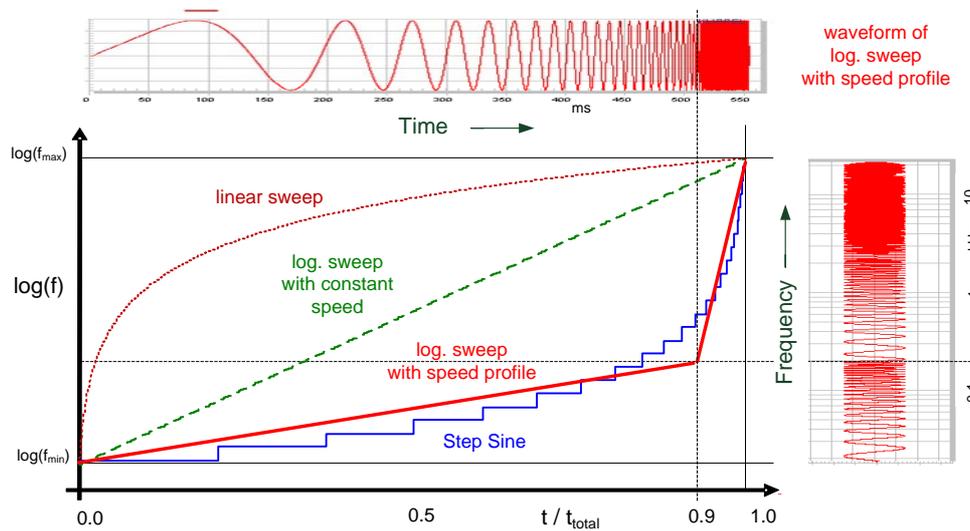


Fig. 7. Sinusoidal stimuli for measuring the transfer behaviour of loudspeakers

Fig. 7. Estímulo senoidal para medição do comportamento de alto-falantes

Loudspeakers are passive systems which require an electrical AC signal to produce an acoustical output. A sinusoidal stimulus excites the device at only one defined frequency and generates the fundamental component. All other frequency components found in the output spectrum can be identified as non-linear signal distortion or measurement noise. This measurement has to be applied to other frequencies within the audio band of interest (e.g., 20 Hz to 20 kHz) by stepping the frequency over discrete points with sufficient resolution (e.g., $1/10^{\text{th}}$ of an octave) or by using a sinusoidal chirp sweeping continuously over all frequencies. The *stepped sine* stimulus stays at each frequency for a fixed number of periods (usually 5) to generate steady-state condition and to separate pre- and post-ringing after changing the frequency. Fig. 7 shows that the stepped sine stimulus spends most of the measurement time at low frequencies where the period length is long and both devices under the test and measurement instrument need a longer settling time. A complete measurement according to the minimal requirement can be accomplished within 1.5 s. Speeding up the measurement by reducing the number of test tones is not possible because

the poor frequency resolution jeopardizes the excitation of loudspeaker defects behaving as narrow band resonators (e.g., buzzing parts not glued properly).

Alto-falantes são sistemas passivos que precisam de um sinal elétrico AC para produzir uma saída acústica. Um estímulo senoidal excita o dispositivo em apenas uma frequência definida e gera a componente fundamental. Todas outras componentes de frequência presentes no espectro de saída podem ser identificadas como uma distorção não-linear do sinal ou um ruído de medição. Esta medida tem de ser aplicada para outras frequências dentro da faixa de áudio de interesse (por exemplo, 20 Hz a 20 kHz), intensificando a frequência sobre pontos discretos com resolução suficiente (por exemplo, 1/10 de uma oitava) ou usando uma senóide *chirp* varrendo continuamente todas as frequências. O estímulo seno *stepped* permanece em cada frequência com número fixo de períodos (geralmente 5) para gerar uma condição *steady-state* e separar pré e pós zumbidos depois de mudada a frequência. A Fig. 7 mostra que o estímulo seno *stepped* passa a maior parte do tempo de medição em baixas frequências, onde a duração do período é longo e ambos dispositivos sob teste e o instrumento de medição precisam de um tempo de sedimentação. Uma medição completa de acordo com a exigência mínima pode ser realizada dentro de 1,5s, porém não é possível acelerar a medição através da redução do número de tons de teste pois a resolução de frequências pobres compromete a excitação dos defeitos do alto-falante, comportando-se como ressonadores de banda estreita (por exemplo, zumbido de partes que não estão coladas corretamente).

Continuous sweeps excite all frequencies using a defined mapping between instantaneous frequency and measurement time. The *linear sweep* passes the low frequencies quickly and spends most of the time at higher frequencies. The measurement time should be about 20 s to provide sufficient resolution at low frequencies according to minimal requirements. The *logarithmic sweep* with a corresponding frequency-time mapping reduces the measurement time at higher frequencies for the benefit of lower frequencies accomplishing the measurement within 0.4 s. However, the measurement time can be reduced even further to 0.2 s by using a *sinusoidal sweep with speed profile* sweep as illustrated in Fig. 7. This stimulus comprises logarithmic sections with different sweep speeds and approximates the preferred frequency-time mapping of the stepped sine stimulus. It spends 90% of the measurement time below 200 Hz to activate all kinds of irregular loudspeaker defects and passes the high frequency range at a 10 times higher sweep speed.

Varreduras contínuas excitam todas as frequências usando um mapeamento definido entre a frequência instantânea e o tempo de medição. A varredura linear passa rapidamente pelas baixas frequências e permanece na maior parte do tempo nas frequências mais altas. O tempo de medição deve ser de cerca de 20s para proporcionar uma resolução suficiente em baixas frequências de acordo com os requisitos mínimos. A varredura logarítmica, com um mapeamento frequência-tempo correspondente, reduz o tempo de medição em frequências mais altas, o que facilita as frequências mais baixas de realizarem a medição dentro de 0,4s. No entanto, o tempo de medição pode ser ainda reduzido para 0,2s usando-se uma varredura senoidal com perfil de velocidade de varredura, conforme ilustrado na Fig. 7. Este estímulo é composto por seções logarítmicas com diferentes velocidades de varredura e aproxima o mapeamento frequência-tempo preferido do estímulo seno *stepped*. Gasta-se 90% do tempo de medição abaixo de 200 Hz para ativar todos os tipos de defeitos irregulares do

alto-falante e passar a faixa de frequência alta a uma velocidade de varredura 10 vezes mais rápida.

Although the sinusoidal sweep with speed profile is a convenient stimulus for ultra-fast testing of audio equipment and other electronic devices, it cannot assess the intermodulation distortion generated by non-linearities in the device under test. A sparse multi-tone signal comprising a multitude of distinct tones at a defined spectral distance and pseudo-random phase produces a noise-like stimulus which has properties similar to a steady-state audio signal, generating all kinds of harmonic and intermodulation distortion components in the output signal. This stimulus is ideal for assessing the large signal performance of loudspeakers and to identify motor and suspension non-linearities.

Embora a varredura senoidal com perfil de velocidade seja um estímulo conveniente para os testes ultra-rápidos de equipamentos de áudio e de outros dispositivos eletrônicos, não é possível avaliar a distorção de intermodulação gerada pelas não-linearidades no dispositivo em teste. Um sinal multi-tons disperso compreende uma multiplicidade de tons distintos, a uma distância espectral definida e uma fase pseudo-aleatória produz um estímulo de ruído com propriedades semelhantes a um sinal de áudio de estado estacionário, gerando todos os tipos de componentes de distorção harmônica e por intermodulação no sinal de saída. Este estímulo é ideal para avaliar o desempenho de grandes sinais de alto-falantes e identificar as não-linearidades do motor e da suspensão.

Music, speech and other natural audio signals play an important role in systematic listening tests during the design phase but play a minor role in stimulating devices during end-of-line testing because those tests are inferior with respect to sensitivity and speed.

A música, a fala e outros sinais de áudio naturais desempenham um papel importante nos testes de audição sistemáticos durante a fase de projeto, porém desempenham um papel menor em dispositivos estimulante durante o teste final, pois os testes são inferiores com relação a sensibilidade e a velocidade.

3.3 Sensor System Sistema de sensor

Monitoring relevant state variables of the device under test is a further requirement for achieving high sensitivity in end-of-line testing. This question is closely related to the selection of optimal sensors and can be answered by using information from physical modelling as discussed in section 2. For example, the state of a loudspeaker can be observed in the electrical, mechanical or acoustical domain.

O monitoramento de variáveis de estado relevantes do dispositivo em teste é outra exigência para obter-se alta sensibilidade no testes fim-de-linha de produção. Esta questão está fortemente relacionada com a seleção de sensores ideais e pode ser respondida usando informações provenientes de modelagens físicas, como discutido na seção 2. Por exemplo, o estado de um alto-falante pode ser observado no domínio elétrico, mecânico ou acústico.

The acoustical measurement is indispensable for detecting air leakage noise and other impulsive distortion generated in the mechanical and acoustical domains which also have a high impact on the perceived sound quality. However, the sound pressure signal is less suited for assessing the properties of the electrical and mechanical system modelled by

lumped parameters as shown in Fig. 2. A simple measurement of the electrical signals at the loudspeaker terminals provide results which are more reliable and easier to interpret. The direct measurement of mechanical state variables by scanning techniques is important for assessing the cone vibration during the design process, but until now has played a minor role in end-of-line testing. However, inexpensive triangulation lasers are already being used for testing spiders, passive radiators, diaphragm and other mechanical loudspeaker parts on the assembly line.

A medição acústica é indispensável na detecção de ruído de vazamento de ar e na distorção impulsiva gerada em domínios mecânicos e acústicos, que também tem um alto impacto na qualidade do som percebido. No entanto, o sinal de pressão sonora não é tão adequado para avaliar as propriedades do sistema elétrico e mecânico modelados por parâmetros concentrados, como mostrado na Fig. 2. Uma medição simples dos sinais elétricos nos terminais do alto-falante fornece resultados mais confiáveis e de fácil interpretação. A medição direta das variáveis de estado mecânico por meio de técnicas de varredura é importante para avaliar a vibração do cone durante o processo de projeto, mas até agora tem desempenhado um papel menor no teste fim de linha. No entanto, *lasers* de triangulação baratos já estão sendo usados nos testes de aranhas, radiadores passivos, diafragma e outras partes mecânicas do alto-falante na linha de montagem.

Multiple sensors combined into an array (e.g., microphone array) and parallel acquisition of the sensor output signals are required to localize the position of the defect in a sound field or a mechanical structure corresponding with a distributed parameter model. The number of sensors and locations in a sensor array depends on wavelength of the signal components and the distance to the source. The position of defects generating deterministic symptoms can also be determined by repeating the measurements while changing the position of the sensor.

Vários sensores combinados em série (por exemplo, série de microfones) e em paralelo nos sinais de saída do sensor são necessários para localizar a posição do defeito no campo de som ou em uma estrutura mecânica correspondente com um modelo de parâmetro distribuído. O número de sensores e de localizações em uma série de sensores depende do comprimento de onda das componentes do sinal e da distância da fonte. A posição de defeitos gerando sintomas deterministas também pode ser determinada através da repetição de medições mudando a posição do sensor.

4 Feature Extraction Extração de características

The objective of signal analysis is to extract features from the monitored signals which reveal the symptoms of the defect, to remove redundancy in the data and to suppress information not relevant for the quality assessment. This section can only give a short overview on plurality of traditional and new methods used for end-of-line testing.

O objetivo da análise do sinal é extrair as características dos sinais monitorados que revelam os sintomas do defeito, a fim de remover as redundâncias no arquivo e anular as informações não relevantes na avaliação da qualidade. Esta seção apresenta apenas uma breve visão de diversos métodos, novos e tradicionais, usados no teste fim de linha de produção.

4.1 Signal Analysis Análise de sinais

The first class of methods as summarized in Table 1 are applied to the time signals at the sensor outputs. There are no assumptions made as to how the device under test is excited and what properties the stimulus has. There is also no physical model of the device required. Thus the signal analysis is the most general approach which can be applied to all kinds of devices under test.

A primeira classe de métodos, como resumidos na Tabela 1, são aplicados em sinais de tempo nas saídas do sensor. Não há suposições feitas sobre como o dispositivo em teste é excitado, quais são as propriedades do estímulo e também não há um modelo físico do dispositivo necessário. Assim, a análise de sinais é a abordagem mais genérica que pode ser aplicada a todos os tipos de dispositivos em teste.

Signal Characteristics Características do sinal	Measurement technique and diagnostic value Técnica de medição e importância do diagnóstico
Rms value Valor rms	corresponds to the power of the signal (e.g., SPL) and is a simple and sensitive characteristic for detecting defects generated by deterministic processes (e.g., variation of loudspeaker sensitivity). Corresponde a potência do sinal (por exemplo, SPL) e é uma característica simples e sensível para detectar-se defeitos gerados por processos deterministas (por exemplo, variação da sensibilidade do alto-falante)
Peak value Valor de pico	is the maximal absolute value of the time signal within a time frame such as a period. This characteristic is good for assessing impulsive distortions which have a low rms value (e.g., loose particles). É o valor absoluto máximo do sinal de tempo em um quadro de tempo, como um período. Esta característica é boa para avaliação de distorções impulsivas que possuem um valor rms baixo (por exemplo, partículas frouxas)
Crest factor Fator de crista	is the ratio between peak and rms value and describes the impulsiveness of the signal independent of the magnitude of the signal (a crest factor > 10 dB indicates an irregular defect in loudspeakers). É a média entre o valor de pico e o rms e descreve a impulsividade do sinal, independente da sua magnitude (fator de crista > 10 dB indica um defeito irregular do alto-falante)
Autocorrelation function $\psi(\tau)$ Função de auto-correlação $\psi(\tau)$	describes the correlation of a time signal $x(t)$ with itself $x(t-\tau)$ using a lag τ and gives information about repeating events (e.g., periodicity, pitch). Descreve a correlação do sinal de tempo $x(t)$ com ele próprio $x(t-\tau)$, usando um atraso τ e gerando informações sobre os eventos repetidos (por exemplo, periodicidade, <i>pitch</i>)
Coherence Coerência	describes the relationship between two signals using the cross-correlation spectrum normalized by the auto correlation of the two signals. This characteristic can be used for detecting an invalid measurement corrupted by an ambient noise source using a multi-sensor system (Bendat & Piersol, 1980). Descreve a relação entre 2 sinais usando um espectro de correlação cruzada, normalizada pela auto correlação dos 2 sinais. Esta característica pode ser usada para detectar uma medição inválida, corrompida por uma fonte de ruído ambiente, usando-se um sistema de multi-sensor
Periodicity Periodicidade	can be assessed by the crest factor of the autocorrelation function $\psi(\tau)$ of the signal for $\tau \neq 0$. A high value indicates a repetitive process (e.g., sound emitted by electrical motor). Pode ser avaliada pelo fator de crista da função de auto-correlação $\psi(\tau)$ do sinal para $\tau \neq 0$. Um valor alto indica um processo repetitivo (por exemplo, som emitido por um motor elétrico)

Period length T Duração do período	is the time difference between adjacent maxima in the autocorrelation function corresponding with the lowest frequency component generated by a deterministic process (e.g., revolution of a car engine). É a diferença de tempo entre uma adjacente máxima na função de auto-correlação correspondente com a componente mais baixa gerada pelo processo determinista (por exemplo, revolução do motor de um carro)
Synchronous average Média síncrona	is the mean value of adjacent sections of a repetitive time signal with the period length T and reveals the deterministic periodical component while attenuating all random and non-periodical components (e.g., ambient noise). É o valor médio das seções adjacentes de uma repetição do sinal de tempo, com uma duração de período T. Revela a componente determinista periodica quando todas componentes aleatórias e não-periódicas forem atenuadas (por exemplo, ruído ambiente)
Random residual Residual aleatório	is the difference between the original time signal and the synchronous average and reveals random and non-periodical components (e.g., loose particles, air leakage noise, external disturbances of production noise) in the time domain (Klippel, 2010). É a diferença entre o sinal de tempo original e a média síncrona. Revela componentes aleatórias e não-periodicas (por exemplo, partículas frouxas, ruído de vazamento de ar, distúrbios externos) no domínio do tempo (Klippel, 2010)
Cepstrum	is the inverse Fourier transform of a logarithmic spectrum (Oppenheim & Schaffer, 2004) which is useful for the deconvolution of source signal (e.g., engine noise) and the impulse response describing the propagation of the signal (e.g., radiation by the car body). É a transformada de Fourier inversa de um espectro logaritmico (Oppenheim & Schaffer, 2004), usual para a deconvolução do sinal da fonte (por exemplo, ruído do motor) e da resposta de impulso descrevendo a propagação do sinal (por exemplo, radiação através do carroceria do carro)
Signal Envelope Envelope do sinal	is the magnitude of the analytical signal calculated by using the Hilbert transform or by performing a demodulation of the signal which is useful for detecting defects generated by a semi-random process such as modulated air leakage noise (Klippel, 2010). É a magnitude do sinal analítico calculado usando a Transformada de Hilbert ou representando uma demodulação do sinal, usual na detecção de defeitos gerados por um processo semi-aleatório, tal como ruído do vazamento de ar modulado (Klippel, 2010)
Discrete Fourier Transform (DFT) Transformada discreta de Fourier	provides a line spectrum of a time sequence which is assumed to be periodical. This transform is preferred for synchronous analysis of periodical signals where the length of the DFT corresponds to multiples of the period length T of the signal (e.g., hard bottoming of the voice coil at the pole plate). Fornecer um espectro de linha de uma sequência de tempo que é periodica. Esta transformação é preferida para a análise síncrona de sinais periódicos, onde o comprimento da DFT corresponde a múltiplos da duração do período T do sinal (por exemplo, forte assentamento da bobina móvel na placa polar)
Short-time Fourier Transform (STFT) Transformada de Fourier em tempo curto	is a frequency-time analysis applying windowing to the waveform prior to a discrete Fourier transform. The transform is preferred for non-stationary signals where either a high frequency or a high temporal resolution is required (Boashash, 2003). É a análise frequência-tempo aplicando a <i>windowing</i> para a priorizar a Transformada discreta de Fourier. A transformada é preferida para sinais não-estacionários, onde é necessária uma frequência alta ou uma resolução de tempo alta (Boashash, 2003).
Discrete Wavelet Transform (DWT) Transformada discreta de Wavelet	is a frequency-time analysis using wavelets with a temporal length scaled according to the analyzed frequency band. This transform is preferred for non-stationary signals where a high frequency resolution at low frequencies and high temporal resolution at high frequencies is required (Percival & Walden, 2000). É a análise frequência-tempo usando pequenas ondulações com uma escala de tempo de acordo com a banda de frequência analisada. Esta Transformada é preferida para sinais não-estacionários, onde são necessárias uma resolução de alta frequência em baixas frequências e uma resolução altamente temporal em altas frequências (Percival & Walden, 2000).

Table 1. Important characteristics provided by signal analysis

Tabela 1. Características importantes fornecidas pela análise de sinais

The applications of the signal analysis techniques will be illustrated on a sound pressure signal measured in the far field of a loudspeaker system having a small air leak. The diagram on the left-hand side of Fig. 8 shows the signal waveforms radiated by the defective loudspeaker as a solid line and the waveform of the same loudspeaker where the leak is sealed as dashed line.

As aplicações das técnicas de análise de sinal serão ilustradas em um sinal da pressão sonora medido no campo distante de um sistema de alto-falante com um pequeno vazamento de ar. O diagrama do lado esquerdo da Fig. 8 mostra as formas de ondas do sinal irradiado pelo alto-falante com defeito, como uma linha sólida, e forma de onda do mesmo alto-falante com o vazamento selado, como linha tracejada.

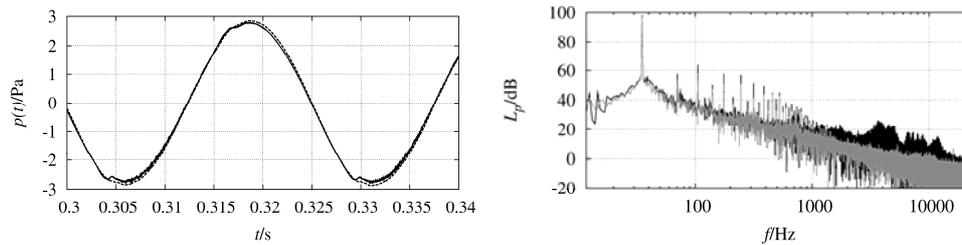


Fig. 8. Waveform (left) and spectrum (right) of the sound pressure signal measured at a leaky enclosure (solid black lines) and a sealed enclosure (dashed grey line) using a sinusoidal stimulus at 35 Hz

Fig. 8. Forma de onda (esquerda) e o espectro (à direita) do sinal de pressão sonora medido em um gabinete com vazamento (linhas sólidas preto) e um selado (linha cinza tracejada) usando um estímulo senoidal de 35 Hz

The loudspeaker without leak generates a smoother waveform but there is neither significant difference in the peak nor in the rms value. The autocorrelation function calculated from both signals reveals high periodicity and a period length of 28.5 ms. The discrete Fourier transform (DFT) applied to the both time signals which are exactly 128 periods long provides the line spectra shown in the right hand side of Fig. 8. There are distinct spectral components at $f_0=35$ Hz and at multiple frequencies $f_n=nf_0$ with $1 < n < 20$ with almost the same sound pressure level (SPL) for the functional and defective unit shown as black and grey lines, respectively. The air leak generates a higher sound pressure level for spectral components above 1 kHz. The power of the symptom is very low (-80 dB) and distributed over a wide frequency range causing a low spectral power density close to the noise floor of the measurement system. Therefore it may be more beneficial to attenuate the low frequency component below 1 kHz and to transform the high frequency component back to the time domain by using an inverse DFT. This corresponds to high-pass filtering of the original sound pressure signal revealing useful symptoms of the air leak.

O alto-falante sem vazamento gera uma onda mais suave, mas não há diferença significativa no pico e no valor rms. A função de autocorrelação calculada de ambos os sinais revela uma

alta periodicidade e uma duração do período de 28,5 ms. A Transformada de Fourier Discreta (DFT) aplicada em ambos sinais de tempo, que são exatamente 128 longos períodos, fornece o espectro em linhas mostrado no lado direito da Fig. 8. Existem componentes espectrais distintas em $f_0=35$ Hz e em frequências múltiplas $f_n=nf_0$ com $1 < n < 20$, com quase o mesmo nível de pressão sonora (SPL) para a unidade funcional e com defeito mostradas como linhas pretas e cinza, respectivamente. O vazamento de ar gera um maior nível de pressão sonora das componentes espectrais acima de 1 kHz. A potência do sintoma é muito baixa (-80 dB) e distribuída por uma ampla faixa de frequência, causando uma baixa densidade de potência espectral perto do ruído de fundo do sistema de medição. Portanto, pode ser mais benéfico atenuar a componente de baixa frequência abaixo de 1 kHz e transformar a componente de alta frequência de volta para o domínio do tempo usando uma DFT inversa. Isso corresponde a filtragem passa-altas do sinal original de pressão sonora revelando sintomas úteis do vazamento de ar.

4.2 System Analysis Análise do sistema

Many devices under test (such as loudspeakers) can be considered as transfer systems requiring an input signal for excitation and generating an output signal closely related to the stimulus, but containing additional signal distortion as shown in Fig. 3. Using a particular test signal with particular properties, the monitored sensor signal can be split into linear, nonlinear and irregular distortion components, providing further characteristics for end-of-line testing as summarized in Table 2.

Muitos dispositivos em teste (como alto-falantes) podem ser considerados como sistemas de transferência, exigindo um sinal de entrada para excitação e gerando um sinal de saída fortemente relacionado com o estímulo, mas contendo uma distorção adicional no sinal, como mostrado na Fig. 3. Usando-se um sinal de teste com propriedades particulares, o sinal do sensor monitorado pode ser dividido em componentes de distorção linear, não linear e irregular, fornecendo ainda mais características para o teste fim-de-linha de produção, conforme resumido na Tabela 2.

System Characteristic Característica do sistema	Measurement technique and diagnostic value Técnicas de medição e importância do diagnóstico
Amplitude Response of the Fundamental Component Resposta em amplitude da componente fundamental	corresponds at small amplitudes with the magnitude of the linear transfer function and reveals failures in the small signal performance (e.g., variation of the cone mass). Corresponde em pequenas amplitudes com a magnitude da função de transferência linear e revela falhas na realização de pequenos sinais (por exemplo, variação da massa do cone)
Phase Response of the Fundamental Component Resposta em fase da componente fundamental	corresponds at small amplitudes to the phase of the linear transfer function and is important for checking time delay (e.g., microphone distance) and polarity. Corresponde em pequenas amplitudes a função de transferência linear e é importante para checar o tempo de atraso (por exemplo, distância do microfone) e polaridade.
Total harmonic distortion (THD) Distorção harmônica	describes the rms value of all harmonic components which are multiples of the excitation frequency. It reveals the dominant nonlinearities (e.g., nonlinear stiffness of the mechanical suspension in loudspeakers).

total (THD)	Descreve o valor rms de todas as componentes harmônicas múltiplas da frequência de excitação. Revela as não-linearidade dominantes (por exemplo, rigidez não-linear da suspensão mecânica do alto-falante)
Total harmonic distortion and noise (THD+N) Distorção harmônica total e ruído (THD+N)	describes the rms value of all signal components without fundamental component. It reveals the dominant nonlinearities and other disturbances which are not at multiples of the fundamental frequency (e.g., humming component at 50 Hz asynchronous to the excitation signal). Descreve o valor rms das componentes do sinal fundamental. Revela as não-linearidades dominantes e outros distúrbios que não são múltiplos da frequência fundamental (por exemplo, componente sussurante em 50Hz, assíncrona com o sinal de excitação)
2 nd -order harmonic distortion Distorção harmônica de 2 ordem	indicates an asymmetrical shape of the nonlinearity inherent in the system (e.g., a different stiffness of the mechanical suspension for positive and negative displacement). Indica uma forma assimétrica da não-linearidade inerente no sistema (por exemplo, uma rigidez diferente da suspensão mecânica no deslocamento positivo e negativo)
3 rd -order harmonic distortion Distorção harmônica de 3 ordem	indicates a symmetrical shape of the nonlinearity (e.g., symmetrical limiting of the mechanical suspension). Indica uma forma assimétrica da não-linearidade (por exemplo, limite simétrico da suspensão mecânica)
Peak-value of higher-order distortion Valor de pico da distorção de ordem superior	measured by using a sinusoidal stimulus of frequency f_0 , high-pass filtering of the sensor signal at a cut-off frequency $f_c > 10f_0$ and detecting the peak value within a period $1/f_0$ in the time domain (Irrgang, 2006). This characteristic is sensitive for all kinds of impulsive distortion generated by a random or deterministic process (e.g., voice coil rubbing). Medido através de um estímulo senoidal de frequência f_0 , filtrada passa-altas do sinal do sensor em uma frequência de corte $f_c > 10f_0$, detectando o valor de pico em um período $1/f_0$ no domínio do tempo (Irrgang, 2006). Esta característica é sensível para todos os tipos de distorção impulsiva gerada por um processo aleatório e determinista (por exemplo, atrito da bobina móvel)
Peak value of higher-order harmonic distortion Valor de pico da distorção harmônica de ordem superior	measured by using a sinusoidal stimulus of frequency f_0 , detecting the peak value within a period $1/f_0$ in the sensor time signal comprising only nth-order harmonics with $n > 10$ (Klippel, 2003). This characteristic reveals the impulsive distortion generated by a deterministic process (e.g., hitting the back plate). Medido através de um estímulo senoidal de frequência f_0 , detectando-se o valor de pico em um período $1/f_0$ no sinal de tempo do sensor, compreendendo somente os harmônicos de enésima ordem com $n > 10$ (Klippel, 2003). Esta característica revela a distorção impulsiva gerada por um processo determinista (por exemplo, batida na placa traseira)
Peak value of higher-order non-harmonic distortion Valor de pico da distorção de não-harmônicos de ordem superior	measured by using a sinusoidal stimulus of frequency f_0 , filtering of the sensor signal to select only non-harmonic components above a cut-off frequency $f_c > 10f_0$ and detecting the peak value within a period $1/f_0$ in the time domain (Klippel, 2011). This characteristic reveals the impulsive distortion generated by a random process (e.g., loose particles). Medido através de um estímulo de frequência f_0 , filtrando-se o sinal do sensor para selecionar somente as componentes não harmônicas acima da frequência de corte $f_c > 10f_0$ e detectar o valor de pico em um período $1/f_0$ no domínio do tempo (Klippel, 2011). Esta característica revela a distorção impulsiva gerada por um processo aleatório (por exemplo, partículas frouxas)
Peak value in the envelope of non-harmonic distortion Valor de pico no envelope da distorção não-harmônica	measured by using a sinusoidal stimulus of frequency f_0 , filtering of the sensor signal to select only non-harmonic components above a cut-off frequency $f_c > 10f_0$ and reading the peak value in the envelope of the demodulated signal averaged over multiple periods (Klippel, 2011). This characteristic reveals semi-random processes having a random fine structure but a deterministic envelope (e.g., air leakage noise). Medido através de um estímulo de frequência f_0 , filtrando-se o sinal do sensor para selecionar somente as componentes não-harmônicas acima da frequência de corte $f_c > 10f_0$ e lendo-se o valor de pico no envelope do sinal médio demodulado sobre múltiplos períodos (Klippel, 2011). Esta característica revela um processo semi-aleatório com uma estrutura aleatória fina, porém um envelope determinista (por exemplo, ruído de vazamento de ar)

Multi-tone distortion Distorção multi-tom	<p>measured by using a sparse multi-tone stimulus and selecting the distortion components in the sensor signal found at frequencies not excited by the stimulus (Cabot, 1999). This measurement reveals harmonic and intermodulation distortion and is very sensitive for detecting force factor nonlinearity (e.g., caused by voice coil offset).</p> <p>Medido através de um estímulo multi-tom disperso, selecionando-se as componentes de distorção do sinal do sensor encontrado em frequências não excitadas por um estímulo (Cabot, 1999). Esta medição revela a distorção harmônica e de intermodulação e é bastante sensível para detectar uma não-linearidade do fator força (por exemplo, causado por um deslocamento da bobina móvel)</p>
Incoherence Incoerência	<p>describes the deviation from a linear relationship between the input and output signal (complement to coherence). This characteristic may be applied to music, speech and other arbitrary stimuli having a dense spectrum and reflects all kinds of nonlinear signal distortion and noise.</p> <p>Descreve o desvio de uma relação linear entre o sinal de entrada e de saída (complemento à coerência). Esta característica deve ser aplicada à música, fala e outros estímulos arbitrários com um espectro denso que refletem todos os tipos de distorção do sinal não-linear e ruído.</p>

Table 2. Characteristics provided by generic methods of system analysis

Tabela 2. Características fornecidas pelo método genérico de análise de sistemas

Exploiting the properties of the stimulus, the spectral components found in the signal analysis may be interpreted as fundamental or distortion components. The sound pressure signal of the loudspeaker with and without air leak in Fig. 8 has been excited by a sinusoidal test tone at $f_0=35$ Hz. Thus the lowest frequency component found at this frequency is the fundamental component which dominates the total sound pressure signal. The phase of the fundamental component reveals polarity of the loudspeaker and may be used for checking the correct connection of the electrical terminals. The spectral components at multiple frequencies $f_n=nf_0$ with $n \geq 2$ are the n th-order harmonic distortion components generated by the nonlinearities inherent in the device under test. The energetic summation of those components gives the total harmonic distortion THD. The symptoms of the air leak are not only higher-order harmonics ($n > 20$) but also spectral components at other frequencies. Repeating the signal analysis for other excitation frequencies leads to the frequency response of those components.

Explorando-se as propriedades do estímulo, as componentes espectrais encontradas na análise do sinal podem ser interpretadas como componentes fundamentais ou de distorção. O sinal de pressão sonora do alto-falante, com e sem vazamento de ar na Fig. 8, foi excitado por um tom de teste senoidal com $f_0=35$ Hz. Assim, a componente de menor frequência encontrada nessa frequência é a componente fundamental que domina o sinal de pressão sonora total. A fase da componente fundamental revela a polaridade do alto-falante e pode ser utilizada para verificar a conexão correta dos terminais elétricos. As componentes espectrais em múltiplas frequências $f_n=nf_0$, com $n \geq 2$, estão na n ésima ordem das componentes de distorção harmônica geradas pelas não-linearidades inerentes ao dispositivo em teste. A somatória energética dessas componentes resulta na distorção harmônica total THD. Os sintomas do vazamento de ar não são apenas nos harmônicos de ordem superior ($n > 20$), mas também nas componentes espectrais em outras frequências. Repetindo-se a análise do sinal para outras frequências de excitação chega-se à resposta de frequência dessas componentes.

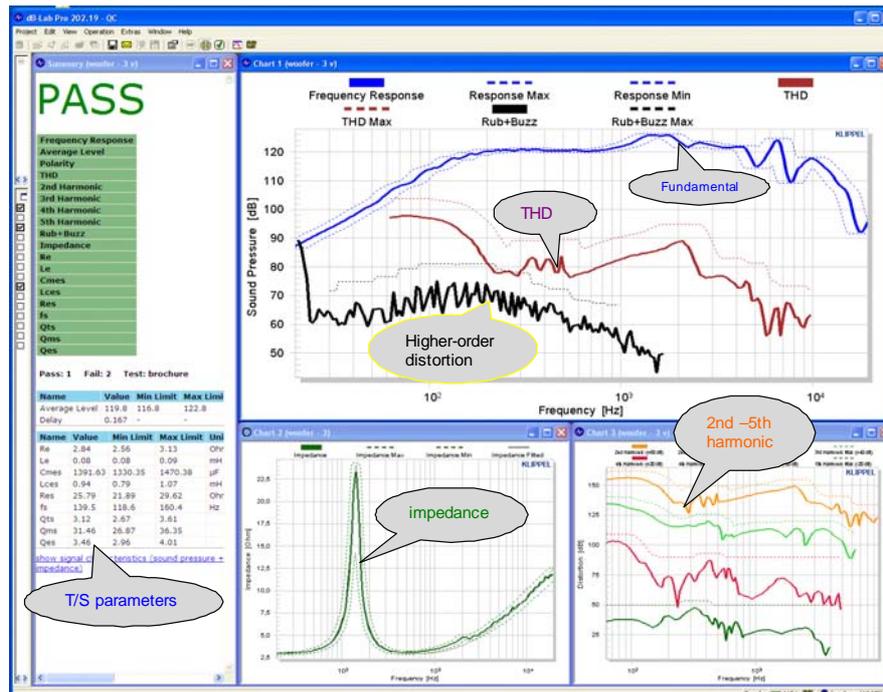


Fig. 9. Results of ultra-fast loudspeaker testing using a 200 ms stimulus

Fig. 9. Resultado do teste ultra-rápido do alto-falante usando um estímulo de 200ms

Fig. 9 shows the frequency responses of the SPL fundamental, 2nd-5th harmonics and the total harmonic distortion in the sound pressure output using a short logarithmic sweep with speed profile as shown in Fig. 7. The roll-off of the fundamental component at the cut-off 100 Hz limits the usable audio band at lower frequencies, while the break-up modes cause the peaks and dips at higher frequencies. The motor and suspension nonlinearities cause a high value of THD at low frequencies. The higher-order distortions curve is 45-60 dB below the fundamental and shows that the device under test has no impulsive distortion generated by a rubbing coil or other irregular defects.

A Fig. 9 mostra as respostas de frequência do SPL da fundamental, dos harmônicos (do segundo ao quinto) e a distorção harmônica total na saída de pressão sonora, através de uma varredura logarítmica curta com perfil de velocidade, como mostrado na Fig. 7. O *roll-off* da componente fundamental na frequência de corte de 100 Hz limita a banda de áudio utilizada em frequências mais baixas, enquanto que os modos *break-up* causam picos e quedas em frequências mais altas. As não-linearidades do motor e da suspensão causam um alto valor de THD em baixas frequências. A curva das distorções de ordem superior está 45-60dB abaixo da fundamental e mostra que o dispositivo em teste não tem distorção impulsiva gerada por um atrito da bobina ou por outros defeitos irregulares.

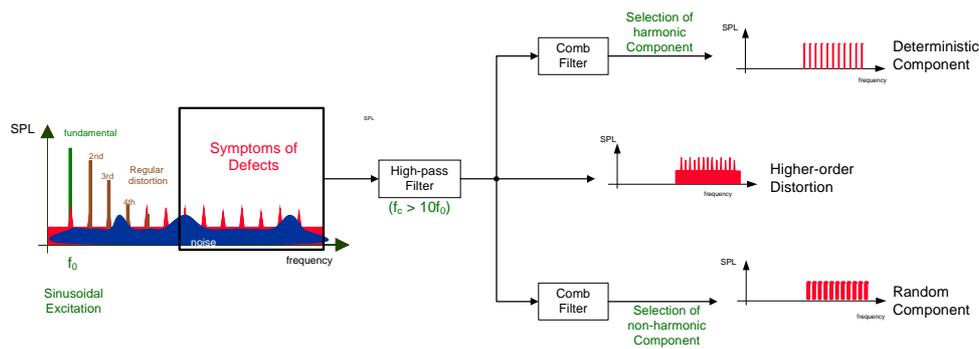


Fig. 10. Separation of the deterministic and random distortion components using a sinusoidal stimulus

Fig. 10. Separação das componentes de distorção determinista e aleatória, usando um estímulo senoidal

To increase the sensitivity of the end-of-line measurement and to identify the physical cause of the defect further features have to be derived from the measured signals. Synchronous averaging over adjacent periods provides the deterministic component at a higher signal-to-noise ratio while suppressing measurement noise and other random components. This can also be realized by a comb filter selecting all harmonic components in the high-pass filtered signal as shown in Fig. 10. The complementary signal comprising only non-harmonic components is a random signal.

Para aumentar a sensibilidade da medição no fim de linha de produção e para identificar a causa física do defeito, as características adicionais precisam ser derivadas a partir dos sinais medidos. A média síncrona ao longo de períodos adjacentes fornece a componente determinista em uma maior relação sinal-ruído, quando o ruído de medição e outras componentes aleatórias forem anuladas. Isso também pode ser realizado por um filtro pente selecionando todas as componentes harmônicas do sinal filtrado passa-altas, como mostrado na Fig. 10. O sinal complementar, compreendendo apenas as componentes não-harmônicas, é um sinal aleatório.

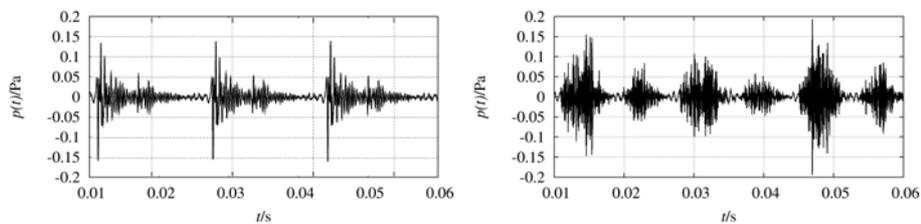


Fig. 11. Separation of deterministic distortion component (left) caused by a buzzing loose joint and random distortion component (right) generated by an air leak

Fig. 11. Separação da componente de distorção determinista (esquerda) causada por uma junção frouxa zumbindo e uma componente de distorção (direita) gerada por um vazamento de ar

Fig. 11 illustrates the benefit of this separation on a loudspeaker having two defects. The periodic waveform in the left diagram reveals a deterministic defect caused by a buzzing loose joint while the random component on the right side is caused by an air leak in the enclosure. Turbulent noise generated at the leak has a completely random fine structure, but the envelope of the noise is deterministic due to the modulation process discussed in Fig. 5. Since the amplitude of air leakage noise is very small and in the same order as ambient noise (e.g., air conditioning) a measurement technique which accumulates the energy over time is required. Direct averaging of random distortion signals over multiple periods will reduce the noise signal and reveal no meaningful symptoms. Demodulation of the random distortion signal and synchronous averaging of the envelope as shown in Fig. 12 provides a sensitive feature for detecting semi random noise reliably (Klippel & Werner, 2010).

A Fig. 11 ilustra a vantagem desta separação em um alto-falante com dois defeitos. A forma de onda periódica no diagrama à esquerda revela um defeito determinista, causado por uma junção frouxa zumbindo, enquanto a componente aleatória no lado direito é causado por um vazamento de ar no gabinete. O ruído de turbulência gerado no vazamento tem uma estrutura fina completamente aleatória, mas o envelope do ruído é determinista devido ao processo de modulação discutido na Fig. 5. Uma vez que a amplitude do ruído do vazamento de ar é muito pequena e na mesma ordem que o ruído ambiente (por exemplo, ar condicionado), é necessária uma técnica de medição que acumule a energia ao longo do tempo. A média direta dos sinais de distorção aleatórios ao longo de múltiplos períodos reduz o sinal de ruído e não revela sintomas significativos. A demodulação do sinal de distorção aleatório e a média síncrona do envelope, como mostrado na Fig. 12, é sensível na detecção de ruído semi aleatório (Klippel & Werner, 2010).

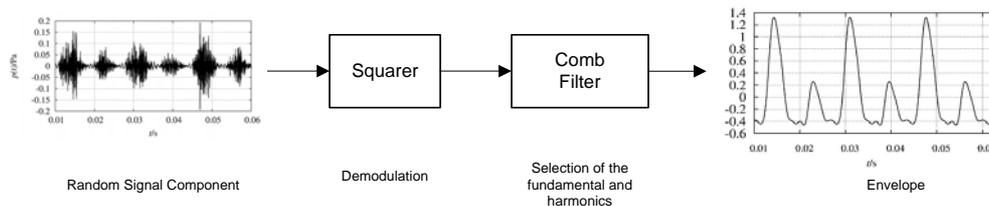


Fig. 12. Detection of turbulent noise generated by air leaks by demodulating the random signal component and synchronous averaging of the envelope

Fig. 12. Detecção de ruído turbulento, gerado pelo vazamento de ar, através da demodulação da componente aleatória do sinal e da média síncrona do envelope

4.3 Model Identification Identificação do modelo

Exploiting available a-priori information on the physics of the device under test provides further features for end-of-line testing. These are more closely related to the material and geometrical properties of the device. Table 3 gives an overview on those characteristics:

Ao explorar as informações a-priori disponíveis sobre a física do dispositivo em teste, são encontrados recursos adicionais para o teste fim-de-linha. Estes estão mais estreitamente relacionados com o material e com as propriedades geométricas do dispositivo. A Tabela 3 dá uma visão geral sobre essas características:

Characteristic Características	Measurement technique and diagnostic value Técnicas de medição e importância dos diagnósticos
Parameters Parâmetros	<p>of the model are identified by reducing a cost function assessing the difference between estimated and measured signals. The estimated parameters describe the particular device under test and are independent of the stimulus used. The parameters have a physical meaning (e.g., force factor) and correspond to material parameters and geometrical variation (e.g., voice coil offset in mm) and can be used for process control.</p> <p>Do modelo são identificados através da redução de custos em função da avaliação da diferença entre os sinais estimados e medidos. Os parâmetros estimados descrevem um determinado dispositivo em teste e são independentes do estímulo utilizado. Os parâmetros tem um significado físico (por exemplo, fator força) e correspondem aos parâmetros do material e a variação geométrica (por exemplo, deslocamento da bobina móvel em mm) e pode ser usado para controle de processos.</p>
State variables Variáveis de estado	<p>can be calculated for the particular stimulus by using the model and identified parameters. This is beneficial for assessing state variables (e.g., voice coil displacement) which cannot be monitored at the end of line or require an expensive sensor (e.g., laser) otherwise.</p> <p>podem ser calculadas por um estímulo particular, usando o modelo e os parâmetros identificados. É vantajoso para a avaliação das variáveis de estado (por exemplo, deslocamento da bobina móvel) que não podem ser monitoradas no fim de linha ou requerem um sensor caro (por exemplo, <i>laser</i>).</p>
Signal Distortion Distorção do sinal	<p>can be calculated for the particular stimulus by using the identified model giving access to the linear and nonlinear signal components. This technique allows separating regular distortion found in functional units from irregular distortion generating by defects (loose particles).</p> <p>Pode ser calculada por um estímulo particular, usando o modelo identificado, permitindo a avaliação das componentes linear e não-linear do sinal. Esta técnica permite a separação da distorção, regular encontrada nas unidades funcionais, da distorção gerada por defeitos (partículas frouxas)</p>
Variables with reduced variance Variáveis com variância reduzida	<p>are calculated from the original variables (e.g., resonance frequency) by compensating temperature, humidity and other external factors. This compensation of the climatic influence requires, for example, thermometer and other sensors at the assembly line and a model for predicting the behavior at defined condition. This reduces the common-cause variance in the measured variables and allows application of tighter specification limits.</p> <p>São calculadas pelas variáveis originais (por exemplo, frequência de ressonância) pela compensação da temperatura, humidade e outros fatores externos. Esta compensação da influência climática requer, por exemplo, termômetro e outros sensores da linha de montagem e um modelo para prever o comportamento em uma determinada condição. Isto reduz a variância de causa comum na medição de variáveis e permite a aplicação de menos limites de especificação</p>

Table 3. System identification techniques used for end-of-line testing

Tabela 3. Técnicas de identificação de sistema usado para o teste fim de linha de produção

Linear system identification has a long history in loudspeaker measurement and can be realized by fitting the predicted electrical impedance based on the lumped parameter model in Fig. 2 to the measured impedance response. The best estimate of the free model parameters are the Thiele/Small parameters (T/S) shown on the lower left hand-side of the screenshot Fig. 9. Those parameters include the voice coil resistance, resonance frequency and Q factor and are easy to interpret. However, the linear model is limited to the small signal domain and cannot explain the generation of nonlinear distortion at higher frequencies. Nonlinear system identification exploiting the nonlinear distortion measured in voltage and current at the loudspeaker terminals reveals the loudspeaker nonlinearities in the motor and suspension system. For example, an offset in the voice coil rest position can be detected in the asymmetry (e.g., shift to the right sight) of the bell shaped force factor characteristic as illustrated in Fig. 13.

A identificação do sistema linear tem uma longa história na medição do alto-falante e pode ser realizada através do ajuste da impedância elétrica, prevista com base no modelo de parâmetros concentrados na Fig. 2 para a resposta de impedância medida. A melhor estimativa dos parâmetros do modelo livre são os parâmetros *Thiele/Small* (T/S) mostrados do lado esquerdo inferior do *screenshot* da Fig. 9. Esses parâmetros incluem a resistência da bobina móvel, a frequência de ressonância e o fator Q e são fáceis de interpretar, no entanto, o modelo linear é limitado no domínio de sinal pequeno e não pode explicar a geração de distorção não-linear em frequências mais altas. A identificação de sistemas não-lineares, explorando a distorção não linear medida na tensão e na corrente dos terminais do alto-falante, revela as não-linearidades do alto-falante no sistema de motor e de suspensão. Por exemplo, um deslocamento na posição de repouso da bobina móvel pode ser detectado pela assimetria (por exemplo, tendendo para o lado direito) da característica do fator força em forma de sino, como ilustrado na Fig. 13.

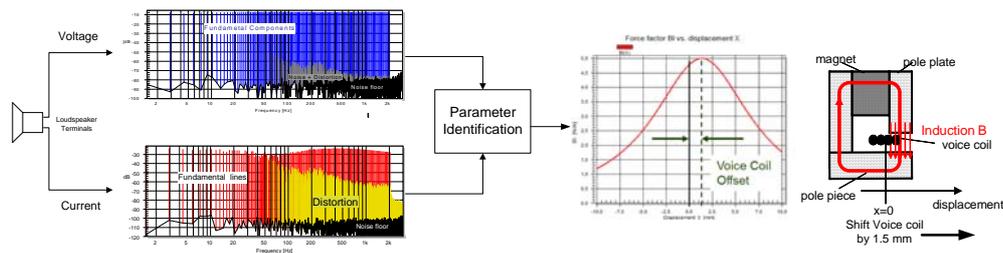


Fig. 13. Measurement of the voice coil offset in mm by identifying the force factor nonlinearity based on voltage and current monitoring at the loudspeaker terminals

Fig. 13. Medição do deslocamento da bobina móvel em mm através da não linearidade do fator força, baseado no monitoramento da tensão e da corrente nos terminais do alto-falante

A model with identified parameters also provides the state variables (e.g., displacement, voice coil temperature) for an arbitrary stimulus and dispenses with an additional sensor (e.g., laser). System identification can also be used for the measurement of irregular distortions (e.g., caused by a small loose particle) which are masked by regular distortion

(e.g., caused by motor and suspension) and not detectable by a human ear or conventional signal and system analysis. Such a defective unit cannot be shipped to the customer because the defect may become worse in the final application (e.g., particle causes voice coil rubbing) eventually generating audible distortion. An adaptive model is used to learn the deterministic properties of the functional devices and synthesize the regular distortion which is subtracted from the measured signal as shown in Fig. 14. Such an active compensation (Irrgang, 2006) increases the sensitivity for irregular distortion by 10 - 30 dB and belongs to the technologies which outperform the capabilities of a human tester.

Um modelo com parâmetros identificados também fornece as variáveis de estado (por exemplo, o deslocamento e a temperatura da bobina móvel) para um estímulo arbitrário e dispensa um sensor adicional (por exemplo, *laser*). A identificação de sistema também pode ser usada para a medição de distorções irregulares (por exemplo, causada por uma pequena partícula frouxa), que são mascaradas pela distorção regular (por exemplo, causados pelo motor e pela suspensão) e não detectável por um ouvido humano, por sinal convencional e pela análise de sistemas. Tal unidade defeituosa não pode ser enviada ao cliente, pois o defeito pode tornar-se pior na aplicação final (por exemplo, as partículas podem causar atrito na bobina), gerando eventualmente distorções. Um modelo adaptativo é usado para aprender as propriedades determinísticas dos dispositivos funcionais e sintetizar a distorção regular, que é subtraída do sinal medido, como mostrado na Fig. 14. Tal compensação ativa (Irrgang, 2006) aumenta a sensibilidade para a distorção irregular em 10-30 dB e pertence às tecnologias que superam as capacidades de um testador humano.

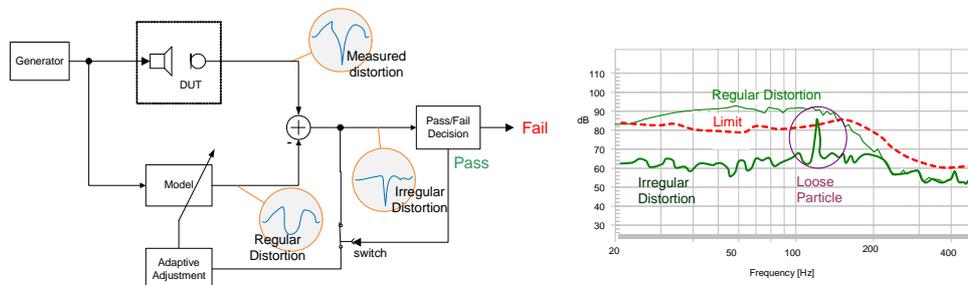


Fig. 14. Active compensation of deterministic properties found in all functional devices under test to increase the sensitivity of the measurement system for defects masked by regular distortion

Fig. 14. Compensação ativa de propriedades determinísticas encontradas em todos dispositivos em teste, a fim de aumentar a sensibilidade do sistema de medição à defeitos mascarados por distorção regular

4.4 Feature Reduction Redução de recurso

The previous discussion focussed on analysis techniques for increasing the sensitivity of the measurement instrument to ensure reliable detection of all potential defects in the device under test. However, features which are not relevant, redundant or having low diagnostic value should be excluded from the following classification to keep the data size small and

the processing fast and robust. Table 4 provides an overview of the most important techniques for reducing the dimensions of the feature space.

A discussão anterior focou-se nas técnicas de análise para aumentar a sensibilidade do instrumento de medição e garantir uma detecção confiável de todos os defeitos potenciais no dispositivo em teste. No entanto, as características que não são relevantes, redundantes ou de baixo valor de diagnóstico devem ser excluídas da classificação seguinte para manter o tamanho de dados pequeno e com processamento rápido e robusto. A Tabela 4 fornece uma visão geral das técnicas mais importantes de redução das dimensões do espaço de características.

Transformation Transformação	Technique and application Técnicas e aplicação
Relativization Relativização	refers a measured value or curve (e.g., absolute distortion) to a reference (e.g., total sound pressure) to generate a relative quantity (e.g., distortion in percent). Refere-se a um valor ou a uma curva, medidos (por exemplo, distorção absoluta) com uma referência (por exemplo, pressão sonora total) para gerar uma quantidade relativa (por exemplo, distorção em percentagem)
Curve smoothing and decimation Suavização da curva e declinação	is the simplest way to reduce the resolution of a curve. Prior to the decimation, an energetic averaging within a defined bandwidth (e.g., third-octave) is useful for fundamental SPL response, while taking the peak value in this interval is more advantageous for higher-order distortion. É o modo mais simples de reduzir a resolução de uma curva. Antes da dizimação, é utilizada uma média de energia dentro de uma largura de banda definida (por exemplo, 1/3 de oitava) para a resposta SPL fundamental. O valor de pico neste intervalo é mais vantajoso para a distorção de ordem superior.
Orthogonalization Ortogonalização	converts an original set of possibly correlated features into a set of independent features using principal component analysis (PCA). The number of principle components is less than or equal to the number of original features. The principle components are ordered to account for decreasing variability in the data. This transformation is useful for reducing the number of data points in one-dimensional curves (e.g., SPL response) and two-dimensional data sets (e.g., time-frequency responses from STFT). Converte uma configuração original, de possíveis características correlatadas, em uma série de característica independentes, usando a análise da componente principal (PCA). O número de componentes principais é menor ou igual ao número de características originais. As componentes principais são ordenadas para explicar o decréscimo de variabilidade dos dados. Esta transformação é usual na redução de números de pontos de dados nas curvas uni-direcionais (por exemplo, resposta SPL) e nos conjuntos de dados bi-dimensionais (por exemplo, respostas de tempo-frequência de STFT)
Prediction of perceptive attributes Predição de atributos perceptivos	is a transformation of physical features measured by an objective measurement technique into perceptive attributes explaining the subjective sensation of a customer or human operator (e.g., audibility of signal distortion (ITU 2001)). É a transformação de características físicas medidas através de uma técnica de medição objetiva em atributos perceptivos, explicando a sensação subjetiva de um cliente ou de um operador humano (por exemplo, audibilidade do sinal de distorção (ITU 2001)).

Table 4: Techniques to reduce the number of features submitted to the classification process

Tabela 4: Técnicas para reduzir o número de recursos submetidos no processo de classificação

5 Classification Classificação

After providing a set of relevant features from physical measurement, the next step is the generation of Pass/Fail verdicts and the identification of the physical cause of the defect.

Depois de fornecer um conjunto de recursos relevantes de medição física, o próximo passo é a definição *Pass/Fail* e a identificação da causa física do defeito.

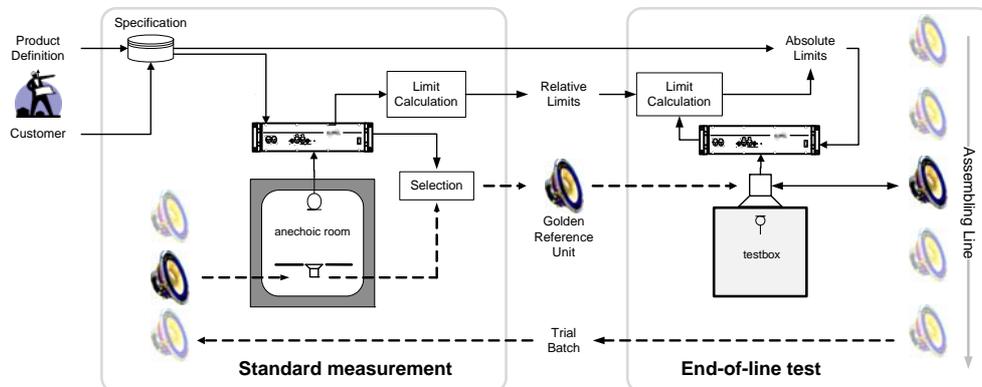


Fig. 15. Methodology for transferring specification limit defined for standard measurement condition (anechoic room) to corresponding specification limits valid for the special measurement condition (test box) used at the end of line

Fig.15. Metodologia para a transferência do limite de especificação, definido para a condição padrão de medição (sala anecóica) correspondendo com os limites de especificação válidos para a condição de medição especial (caixa de teste) usado no fim da linha de produção

5.1 Pass/Fail Decision Decisão *Pass/Fail*

Faulty units can be easily separated from functional units by comparing the measured variables with specification limits. Those limits correspond with either the target performance at the beginning of the product development, the quality found at the first prototype or the requirement defined by the customer. Specification limits referring to standard measurement condition cannot be applied to end-of-line testing if the measurement conditions are different there. For example, most loudspeaker standards define the sound pressure output at 1 m distance from the drive unit operated in a baffle under free field condition. The test box as shown in Fig. 6 is smaller, less expensive and more convenient than an anechoic room, but requires a transformation of the specification limits.

Unidades defeituosas podem ser facilmente separadas de unidades funcionais, comparando-se as variáveis medidas com os limites de especificação. Esses limites correspondem à meta de desempenho no início do desenvolvimento do produto, assim como a qualidade encontrada no primeiro protótipo ou no requisito definido pelo cliente. A especificação de limites referentes a condição de medição padrão não pode ser aplicada nos testes fim de linha, se as condições de medição forem diferentes. Por exemplo, a maioria dos padrões do alto-falante definem a saída de pressão sonora a 1 m de distância da unidade de

acionamento, operado em um *baffle* ao ar livre. A caixa de teste, como mostrado na Fig. 6, é menor, mais barata e mais conveniente do que uma sala anecóica, porém requer uma transformação dos limites de especificação.

This problem can be solved by selecting a limited number of units (usually 10 - 100) and performing a measurement under standard conditions as illustrated in Fig. 15. The functional units which fulfil the specifications are subject to a statistical analysis. After calculating the mean value and variance of all features, *Golden Reference Units* are selected which represent the ensemble best. Some of the absolute specification limits corresponding to standard measurement conditions are replaced by relative limits. Now a Golden Reference Unit and the corresponding relative limits are transferred to the assembly line and measured under non-conformal conditions (e.g., test box). Finally the relative limits are transformed into absolute limits used for end-of-line testing.

Este problema pode ser resolvido selecionando-se um número limitado de unidades (geralmente 10-100) e efetuando-se uma medição em condições normais, como ilustrado na Fig. 15. As unidades funcionais que satisfazem as especificações estão sujeitas a uma análise estatística. Depois de calcular o valor médio e a variância de todos os recursos, as “Unidades de Referência de Ouro” são selecionadas, representando o melhor conjunto. Alguns dos limites de especificação absolutos, correspondentes às condições de medição padrão, são substituídos por limites relativos. Agora, uma “Unidade de Referência de Ouro” e seus limites relativos são transferidos para a linha de montagem e medidos sob condições não-conformes (por exemplo, caixa de teste). Finalmente os limites relativos são transformados em limites absolutos utilizados para o teste fim-de-linha.

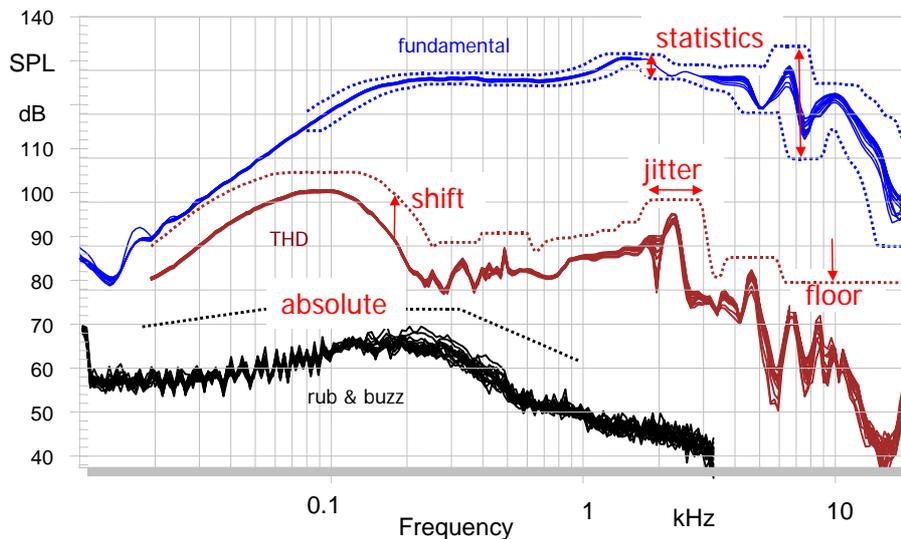


Fig. 16. Algorithms used for calculating specification limits based on statistical characteristics derived from reference units

Fig. 16. Algoritmos utilizados para o cálculo dos limites de especificação baseados em características estatísticas derivadas de unidades de referência

The Golden Reference Unit is stored under manufacturing conditions and can be used to recalibrate the absolute limits at any time when temperature or humidity changes the behaviour of the device under test. This limit calculation process must also consider systematic differences between the just assembled unit where the properties are still varying (e.g., drying adhesive) and the Golden Reference Unit manufactured some time ago.

A “Unidade de Referência de Ouro” é armazenada em condições de fabricação e pode ser usada para recalibrar os limites absolutos a qualquer momento quando a temperatura ou a umidade alterar o comportamento do dispositivo em teste. Este processo de cálculo de limite também deve considerar as diferenças sistemáticas entre a unidade recém-montada, onde as propriedades ainda são variáveis (por exemplo, secagem do adesivo), e a “Unidade de Referência de Ouro” fabricada há algum tempo.

Special algorithms are useful to transfer or generate the specification limits. The shift algorithm is a simple way to generate upper and lower specification limits having a defined distance to the mean value as shown in Fig. 16. If meaningful shifting values are not known, the width of the permissible corridor can be calculated from the variance of the measured variable. For example the upper and lower limits of the fundamental SPL curve in Fig. 16 correspond to ± 3 sigma and make the corridor wider at higher frequencies where the variance of the measured variable rises. The floor algorithm is a useful constraint which keeps the specification limit above a threshold. This is, for example, useful for total harmonic distortions which are acceptable if they are smaller than a defined level. A jitter algorithm increases the tolerances in the horizontal direction to cope with sharp peak and dips having a varying resonance frequency.

Algoritmos especiais são úteis para transferir ou para gerar os limites de especificação. O algoritmo *shift* é uma maneira simples de gerar limites de especificação, superior e inferior, com uma distância definida para o valor médio, como mostrado na Fig. 16. Se os valores de deslocamento significativos não forem conhecidos, a largura do “corredor” permitido pode ser calculado a partir da variação da variável medida. Por exemplo, os limites superior e inferior da curva SPL fundamental na Fig. 16 correspondem a ± 3 sigma e tornam o corredor mais amplo em frequências mais altas, onde a variação da variável medida aumenta. O algoritmo *floor* é uma restrição útil que mantém o limite de especificação acima de um *threshold*. Este é útil, por exemplo, para distorções harmônicas totais que são aceitáveis quando menores que um nível definido. Um algoritmo *jitter* aumenta a tolerância no sentido horizontal para lidar com pico agudo e quedas com uma frequência de ressonância variável.

Statistical algorithms for limit definition have the benefit that only few setup parameters (e.g., shift value) have to be defined which are valid for similar kinds of products. The distance between the measured variable and the upper and lower specification limits may be used as a quantitative measure for grading the quality of the device under test and for assigning the device to a particular quality class.

Os algoritmos *statistical* na definição do limite possuem a vantagem de precisarem apenas da definição de alguns parâmetros de configuração (por exemplo, o valor de deslocamento), os quais são válidos para os mesmos tipos de produtos. A distância entre a variável medida e os limites de especificação superior e inferior pode ser usada como uma medida

quantitativa para classificar a qualidade do dispositivo em teste e atribuir ao dispositivo uma classe de qualidade particulares.

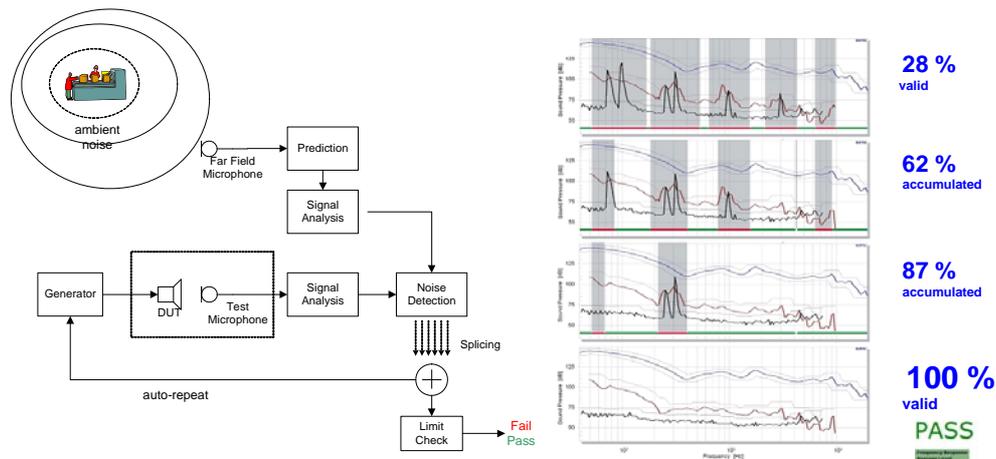


Fig. 17. Test system providing immunity against production noise by detecting invalid measurement and splicing valid parts of repeated measurements together

Fig. 17. Sistema de teste fornecendo imunidade contra a produção de ruído através da detecção de medições inválidas e da união das partes válidas de medições repetidas

5.2 Detection of Invalid Measurements Medições inválidas de detecção

A disturbance from an external source corrupting the monitored signal may invalidate the measurement. Acoustical measurements are especially prone to ambient noise generated in a production environment. A multiple sensor system such as a microphone array can be used for deriving the position of the source and to separate the test signal from the noise. If the test microphone is located in the near field of the loudspeaker as shown in Fig. 17 and a second microphone is located in the far field at some distance from the test microphone, an acoustical disturbance can be detected reliably. The grey sections in the SPL frequency response in the right-hand side of Fig. 17 show the corrupted parts of the measurement.

A perturbação de uma fonte externa corrompendo o sinal monitorado pode invalidar a medição. As medições acústicas estão particularmente propensas ao ruído ambiente gerado em um ambiente de produção. Um sistema de múltiplos sensores, como uma série de microfones, pode ser usado para derivar a posição da fonte e separar o sinal de teste do ruído. Se o microfone de teste estiver localizado no campo perto do alto-falante, como mostrado na Fig. 17, e um segundo microfone estiver localizado no campo distante a alguma distância do microfone de teste, poderá ser detectada uma perturbação acústica de forma confiável. As seções em cinza na resposta de frequência SPL no lado direito da Fig. 17 mostram as partes corrompidas da medição.

Invalid results require a repetition of the measurement, but it is beneficial to store uncorrupted parts of each measurement and to merge those parts with valid parts of the following repetitions resulting in complete valid set of data eventually. This auto-repeat and splicing technique is an important element of ultra-fast testing providing immunity against random production noise.

Resultados inválidos implicam na repetição da medição, porém é vantajoso guardar as peças boas de cada medição e mesclá-las com outras peças válidas das repetições seguintes, resultando eventualmente em conjunto válido de dados completo. Esta técnica de repetição automática e de junção é um elemento importante do teste ultra-rápido, fornecendo imunidade contra o ruído de produção aleatório

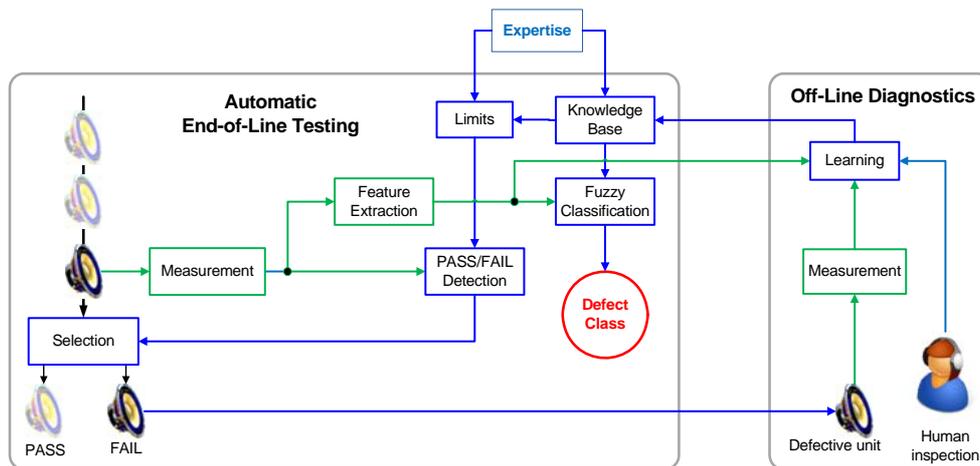


Fig. 18. Automatic classification of defects using information from an external expert and off-line diagnostic

Fig. 18. Classificação automática de defeitos usando informação de um *expert* externo e um diagnóstico *off-line*

5.3 Defect Classification Classificação do defeito

If a device fails permissible specification limits, it is crucial to identify the physical cause of the defect as fast as possible to ensure timely control of the production process and to maintain a low rejection rate. To accomplish this task, an experienced operator or engineer from manufacturing or product design can perform additional measurements-, visual inspection, destructive analysis or other kinds of off-line diagnostics as shown in Fig. 18. For loudspeaker evaluation, new auralization techniques are also useful, providing more sensitivity for defects than normal listening tests. Signal processing can enhance critical distortion components while protecting the operator's ears against the fundamental component's high sound pressure. However, those tools cannot replace the expertise the human investigator has accumulated over time and cannot be transferred to other co-workers.

Se um dispositivo falhar dentro dos limites admissíveis de especificação, é extremamente importante identificar a causa do defeito físico o mais rápido possível para garantir o controle do processo de produção em tempo útil e manter uma taxa de rejeição baixa. Para realizar essa tarefa, um operador experiente ou engenheiro de produção ou de projeto pode realizar medições adicionais, inspeção visual, análise destrutiva ou outros tipos de diagnósticos *off line*, como mostrado na Fig. 18. Para avaliação do alto-falante, são também utilizadas novas técnicas de auralização, proporcionando maior sensibilidade a defeitos do que em testes normais de audição. O processamento de sinal pode melhorar as componentes de distorção críticas, protegendo os ouvidos do operador contra a alta pressão sonora da componente fundamental. No entanto, essas ferramentas não podem substituir a experiência que o investigador humano tem acumulado ao longo do tempo e não podem ser transferida para outros colegas de trabalho.

A new objective of end-of-line testing is combining the results of objective testing with the background information about the physical nature of the defect. The first step in this process is the creation of a class, assigning it a meaningful name and storing all relevant information (symptoms, causes, remedies) in a knowledge base. Generic defect classes (e.g., "electrical shortcut") are already provided by the measurement instrument, but the particular defect classes are generated during the design process and permanently extended during manufacturing. The classifier in Fig. 18 uses this information to determine defect classes which correspond to the measured features at the highest likelihood. Fuzzy logic (Zadeh, 1987) can be used to combine the measured features with non-numeric linguistic variables such as "loudspeaker sounds distorted" and determine the membership of the defect classes. The output of the classification process is not only the name and probability value of the most likely defect class, but also a list of alternative classes at a lower rank. This information is not a strict assignment, but more a guided search process for the operator to determine the most likely defect class.

Um novo objetivo do teste fim de linha é a combinação dos resultados dos testes objetivos com a informação de fundo sobre a natureza física do defeito. O primeiro passo neste processo é a criação de uma classe, atribuindo-lhe um nome significativo e armazenando todas as informações pertinentes (sintomas, causas, remédios) em uma base de conhecimento. Classes de defeitos genéricos (por exemplo, "atalho elétrico") já são fornecidos pelo instrumento de medição, mas as classes de defeitos particulares, são geradas durante o processo de projeto e permanecem estendida durante a fabricação. O classificador na Fig. 18 usa essa informação para determinar as classes de defeitos que correspondem às características medidas com maior probabilidade. A lógica Fuzzy (Zadeh, 1987) pode ser usada para combinar os recursos medidos com as variáveis lingüísticas não-numéricas, como "sons de alto-falante distorcidos", e determinar o conjunto das classes de defeitos. A saída do processo de classificação não é apenas o nome e o valor de probabilidade da classe de maior probabilidade de defeito, mas também uma lista de classes alternativas em uma classificação mais baixa. Esta informação não é uma atribuição estrita, mas um processo de pesquisa orientado para o operador determinar a classe de defeito mais provável.

The verification of the proposed or assumed defect is part of the off-line diagnostics, usually performed on a separate measurement platform. The result of the human inspection is the most important input for the automatic learning process. The measured features of the defective device are used to update the properties of the defect prototype which represents

an existing defect class. If the membership function of all existing classes is low or the QC operator detects a failure not known before, there is the opportunity to create a new defect class where the defective unit is identical to the prototype. An administrator who is usually the line leader or an experienced QC engineer supervises feedback of the operator and can unify two defect classes and may improve the verbal description of the defect. The expert system is a valuable tool for accumulating knowledge to train new, inexperienced co-workers and to simplify the communication between team members.

A verificação do defeito proposto ou assumido faz parte do diagnóstico *off-line*, geralmente realizado em uma plataforma de medição separada. O resultado da inspeção humana é a entrada mais importante para o processo de aprendizagem automática. As características medidas do dispositivo com defeito são usadas para atualizar as propriedades do protótipo defeituoso, que representa uma classe de defeito existente. Se a função de pertinência de todas as classes existentes for baixa ou o operador QC detectar uma falha não conhecida, há a oportunidade de criar uma classe nova de defeitos onde a unidade defeituosa será idêntica ao protótipo. Um administrador que geralmente é o líder de linha ou um engenheiro QC experiente supervisiona o *feedback* do operador e pode unificar duas classes de defeitos para melhorar a descrição verbal do defeito. O sistema do *expert* é uma ferramenta importante para a acumulação de conhecimento para formar novos, inexperientes co-trabalhadores e para simplificar a comunicação entre os membros da equipe.

6 Quality Monitoring and Process Control Monitoramento da qualidade e do controle de processo

Although the detection of defect units is the basic objective of end-of-line testing, the properties of the functional units passing the test also provide valuable information about the stability of the production process. Statistical analysis applied to this data reveals drifts and trends early enough to readjust the process before faulty products are produced.

Embora a detecção de unidades com defeito seja o objetivo básico de testes fim de linha, as propriedades das unidades funcionais que passam no teste também fornecem informações importantes sobre a estabilidade do processo de produção. A análise estatística aplicada a esses dados revela desvios e tendências com antecedência suficiente para reajustar o processo antes dos produtos defeituosos serem produzidos.

6.1 Statistical Analysis Análise estatística

The first step of quality monitoring and process control is the calculation of basic statistical characteristics of the measured variables (e.g., resistance) and classification results (e.g., counts of defects) as summarized in Table 5.

A primeira etapa do monitoramento da qualidade e do controle de processo é o cálculo de características estatísticas básicas das variáveis medidas (por exemplo, resistência) e os resultados da classificação (por exemplo, a contagem de defeitos), conforme resumido na Tabela 5.

Basic characteristic Característica básica	Description and application Descrição e aplicação
Histogram	is used to measure the distribution of a variable by counting the number of points in

Histograma	equally sized, non-overlapping intervals on the data range. The normalized histogram estimates the probability density function pdf and reveals important properties of the distribution (center, spread, skew, outliers and multiple modes). É usado para medir a distribuição de uma variável através da contagem do número de pontos do mesmo tamanho e dos intervalos não sobrepostos no intervalo de dados. O histograma normalizado estima a probabilidade da função de densidade pdf e revela propriedades importantes da distribuição (centro, espalhado, torcido, isolado e modos múltiplos)
Arithmetic Mean \bar{x} Média Aritmética	is the sum of data points x_i of a measured variable divided by the number N of observations. é a soma dos pontos de dados x_i de uma variável medida dividida por um número N de observacoes
Median \tilde{x} Mediana	corresponds to the value of the data point which separates the higher half of the population from the lower half. The median describes the central value of skewed populations more usefully than the mean value and suppresses the effect of outliers. corresponde ao valor dos pontos de dados, que separam a metade maior da população da menor. A mediana descreve o valor central das populações <i>skewed</i> melhor do que o valor médio e anula o efeito de isolamento
Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) Média móvel exponencialmente ponderada	performs a smoothing of the measured data series x_i versus unit index i (or time) by decreasing the weights of old data. The EWMA is used in control charts to detect small shifts and trends at a higher sensitivity than using the mean value calculated in subgroups. Realiza uma suavização da série de dados medidos x_i versus o índice da unidade i (ou tempo) através da diminuição do peso dos dados antigos. O EWMA é utilizado em gráficos de controle para detectar pequenas mudanças e tendências, com uma maior sensibilidade que o valor médio calculado em subgrupos.
Sample Standard Deviation σ Desvio padrão da amostra	describes the variability of the measured single-valued variable x_i . descreve a variabilidade da variável x_i do valor único medido
Range R Intervalo	is calculated by subtracting the lowest value (minimum) from the highest value (maximum) found in subgroups. é calculado pela subtração do valor máximo pelo valor mínimo encontrado nos subgrupos
Rejection Rate RR Taxa de rejeição	is the ratio of non-confirmative or defective units failing the end-of-line test to the total number of units tested. The rejection rate is the complement of the process yield. é a razão das unidades não-conformes ou defeituosas que não passaram no teste fim de linha pelo número total de unidades testadas. A taxa de rejeição é o complemento do processo de rendimento
Defects Per Million Opportunities (DPMO) Defeitos por milhão de oportunidades (DPMO)	is the number of defects (or non-conformities to the specifications) referred to the product of measured devices times the number of defects possible in one unit. é o numero de defeitos (ou não conformes com a especificação) referente ao produto de dispositivos medidos vezes o número de possíveis defeitos em uma unidade

Table 5. Basic statistical characteristics important for end-of-line testing

Tabela 5. Características estatísticas básicas importantes no teste fim de linha de produção

The calculation of those basic characteristics does not require much processing power and can be accomplished by the computer used as part of the end-of-line tester. This provides an additional benefit as warning and alarm signals can be generated automatically and used as feedback at the end of assembly line.

O cálculo dessas características básicas não requer muito poder de processamento e pode ser realizado pelo computador usado como uma parte do testador fim-de-linha. Isto fornece vantagens, como sinais de alerta que podem ser gerados automaticamente e usados como *feedback* no final da linha de montagem.

6.2 Process Stability Estabilidade do processo

Statistical process control (SPC) separates variations arising from common causes typical to a particular production process (e.g., manual soldering of wires) from unanticipated, special causes (e.g., a new batch of parts with different properties is assembled).. Common-cause variations are stable and predictable while special-cause variations have an atypical pattern and are unpredictable, even from a probabilistic point of view, and may require action to stabilize and adjust the process.

O controle estatístico de processo (SPC) separa as variações decorrentes de causas comuns típicas de um determinado processo de produção (por exemplo, manual de soldagem de fios) de imprevistos, as causas especiais (por exemplo, um novo lote de peças com propriedades diferentes é montado). As variações das causas comuns são estáveis e previsíveis, enquanto as variações das causas especiais tem um padrão atípico e imprevisível, mesmo do ponto de vista probabilístico, e pode requerer medidas para estabilizar e ajustar o processo.

The Control Chart is a powerful tool for separating common and special causes. The chart displays the quality characteristic versus time or sample number in comparison with two horizontal lines, the upper control limit (UCL) and the lower control limit (LCL). A centre line between the UCL and LCL curves describes the long-term mean value of the process under control. There are many types of charts applicable to variables (e.g., individual data point of the measured feature, mean value, range) or attributes (e.g., counts of nonconforming units, proportions) of different subgroup sizes based on different statistical assumptions (e.g., underlying distribution) and performance (e.g., sensitivity for shifts). Table 6 describes some of the important charts (further details see Montgomery, 2005).

O gráfico de controle é uma ferramenta poderosa para separar as causas comuns e especiais. Este mostra a característica de qualidade *versus* o tempo ou o número da amostra em comparação com duas linhas horizontais, o limite superior de controle (UCL) e o limite inferior de controle (LCL). A linha central entre as curvas UCL e LCL descreve o valor médio a longo prazo do processo sob controle. Existem vários tipos de gráficos aplicáveis às variáveis (por exemplo, ponto de dados individuais do recurso medido, a média gama, valor) ou atributos (por exemplo, a contagem de unidades não-conformes, proporções) de tamanhos diferentes de subgrupos baseados em diferentes suposições estatísticas (por exemplo, distribuição subjacentes) e desempenho (por exemplo, a sensibilidade à deslocamentos). A Tabela 6 descreve alguns dos gráficos importantes (mais detalhes, ver Montgomery, 2005).

Control chart Gráfico de controle	Definition and application Descrição e aplicação
\bar{x} and σ Chart "X-Bar and S"	contains a pair of charts used to monitor the (short-term) mean value and standard deviation of the variable observed over a relatively large number of units ($n > 10$) in regularly sampled

Chart" Gráfico \bar{x} e σ "X barra e gráfico S"	subgroups. This chart is sensitive for detecting shifts larger than 1.5σ . contém um par de gráficos usados para monitorar o valor principal (curto prazo) e o desvio padrão da variável observados sobre um número de unidades relativamente alto ($n > 10$) em subgrupos amostrados regularmente. Este gráfico é sensível para detectar deslocamentos maiores que 1.5σ
\bar{x} and R Chart "X-Bar and R Chart" Gráfico \bar{x} e R "X barra e gráfico R"	contains a pair of charts used to monitor the (short-term) mean value and maximal variation (range) of the variable observed over a relatively small number of units ($n < 10$) in subgroups. This chart is sensitive for detecting shifts larger than 1.5σ . contém um par de gráficos usados para monitorar (curto prazo) o valor principal e a variação máxima (intervalo) das variáveis observadas sobre um número de unidades relativamente pequeno ($n < 10$) em subgrupos. Este gráfico é sensível para detectar deslocamentos maiores que 1.5σ .
EMWA Control Chart Gráfico de controle EMWA	uses the exponentially-weighted moving average to detect small variation (between $0.5 - 1.5\sigma$) caused by special causes which would be otherwise assigned to the common cause variation using the \bar{x} or other standard control charts. The increased sensitivity for shifts and trends is gained without increasing the chance for false alarms. Usa a média móvel exponencialmente ponderada para detectar pequenas variações (entre 0.5 e 1.5σ) causadas por motivos especiais, que seriam diferentemente atribuídas à variação da causa comum, usando a \bar{x} ou outros gráficos de controle padrão. O aumento da sensibilidade para mudanças e tendências é adquirida sem aumentar as chances de alarmes falsos.
P Chart Gráfico P	is a control chart applied to the ratio (proportion) of nonconforming units to the total number of units using data generated by Pass/Fail decision. É um gráfico de controle aplicado à razão (proporção) de unidades não conformes <i>versus</i> o número de unidades usando os dados gerados pelo <i>Pass/Fail</i>

Table 6. Important control charts for assessing process stability

Tabela 6. Gráficos de controle importantes na avaliação da estabilidade do processo

Comparing the quality characteristic (variables and attributes) with the upper and lower control limits derived from the long term mean value and variability of the process can reveal a critical "out of control" status. Other rules (WECO, 1956; Nelson, 1984) consider additional zones at lower variance and are more sensitive to small shifts and trends. According to the WECO rules, a process is "out of control" if one of the following occurs:

Comparando-se a característica de qualidade (variáveis e atributos), com os limites de controle superior e inferior derivados do valor médio a longo prazo e da variabilidade do processo, pode revelar um estado crítico "fora de controle". Outras regras (WECO, 1956; Nelson, 1984) consideram zonas adicionais com uma menor variância e são mais sensíveis a pequenas mudanças e tendências. De acordo com as regras WECO, um processo está "fora de controle" se ocorrer uma das seguintes situações:

- a single point is outside the $\pm 3\sigma$ range,
- two out of three successive data points are beyond the $\pm 2\sigma$ range,
- four out of five successive points are beyond $\pm 1\sigma$ range or
- eight successive points are on one side of the centre line.
- Um único ponto está fora do intervalo $\pm 3\sigma$
- Dois dos 3 pontos sucessivos de dados estão além do intervalo $\pm 2\sigma$
- Quatro dos cinco pontos consecutivos estão fora do intervalo $\pm 1\sigma$ ou
- Oito pontos sucessivos estão de um lado da linha central

6.3 Process Capability Capacidade do processo

If the production process is stable, it is possible to predict the output of the process by using dedicated characteristics as listed in Table. 7.

Se o processo de produção for estável, é possível prever a saída do processo usando características listadas na Tabela. 7.

Characteristic Característica	Definition and application Descrição e aplicação
Process Capability Index C_{pk} Índice de capacidade de processo C_{pk}	assesses the ability of a process considering the common causes of variation expressed by estimated mean value μ and standard deviation σ of the measured variable to produce output within given upper and lower specification limits USL and LSL, respectively. Montgomery (2005) recommends a minimal C_{pk} value of 1.33 for an existing process and 1.5 for a new process using two-sided specification. Avalia a capacidade de um processo, considerando as causas comuns de variação, expressa pelo valor principal estimado μ e pelo desvio padrão σ da variável medida para produzir uma saída dentro de um limite de especificação superior e inferior USL e LSL, respectivamente. Montgomery (2005) recomenda um valor mínimo de C_{pk} de 1.33 para um processo existente e 1.5 para um novo processo usando uma especificação de 2 lados
Process Performance Index P_{pk} Índice de execução do processo P_{pk}	requires a calculation similar to the process capability index C_{pk} , but can also be applied to an instable process not yet under control. It considers not only the common causes, but also special causes of variance in the process caused by shifts and drifts. Requer um cálculo similar ao índice de capacidade de processo C_{pk} , mas pode também ser aplicado para um processo instável ainda fora de controle. Não são consideradas apenas as causas comuns, mas também causas especiais de variância no processo causada por deslocamento e flutuação

Table 7. Characteristics assessing the performance of the process

Tabela 7. Características que avaliam o desempenho do processo

The yield of the production process corresponds to the process capability index C_{pk} , if the process is normal distributed and stable. For example a $C_{pk}=1.33$ gives a process yield of 99.99 %. To keep the rejection rate below 3 defects per million opportunities (Six sigma) the short term C_{pk} should be larger than 2. A first estimate can be achieved by using a few data points (> 17) but the prediction becomes more precise by using long-term estimates of μ and σ based on a larger number of observations.

O rendimento do processo de produção corresponde ao índice de capacidade do processo C_{pk} , se o processo for estável e distribuído normalmente. Por exemplo, um $C_{pk} = 1,33$ dá um rendimento do processo de 99,99%. Para manter a taxa de rejeição inferior a 3 defeitos por milhão de oportunidades (Seis sigma) a curto prazo, o C_{pk} deve ser maior que 2. Uma primeira estimativa pode ser conseguida através de alguns pontos de dados (> 17), mas a previsão torna-se mais precisa com o uso de estimativas a longo prazo de μ e σ , baseada em um maior número de observações.

6.4 Process Adjustment Ajuste do processo

The control charts and the indices of process capability reveal one or more problems somewhere at the assembly line which require immediate actions to prevent an increase of the rejection rate. If the relationship between symptom and physical cause is not known, a solution for the problem can be searched by a trial and error method. The success of this

approach depends on the intuition and experience of the investigator. A more systematic approach is the fault analysis techniques as listed in Table 8 collecting information on potential problems and optimal remedies.

Os gráficos de controle e os índices de capacidade do processo revelam um ou mais problemas em algum lugar na linha de montagem que requerem ações imediatas para evitar um aumento da taxa de rejeição. Se a relação entre a causa física e o sintoma não for conhecida, uma solução para o problema pode ser pesquisada por um método de tentativa e erro. O sucesso desta abordagem depende da intuição e experiência do pesquisador. Uma abordagem mais sistemática é a falta de técnicas de análise, conforme listado na Tabela 8, coletando informação sobre os problemas potenciais e soluções ideais.

Method Método	Description and application Descrição e aplicação
Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Modo de falha e análise do efeitos (FMEA)	is an inductive method which captures engineering knowledge and experience with similar products, then identifies potential failure modes in future by defining causes, effects and actions and by rating severity, likelihood and detectability (Kmenta& Koshuke, 2004). É um método indutivo, o qual captura conhecimento de engenharia e experiência com produtos similares e, então, identifica os modos de falhas potenciais no futuro definindo as causas, os efeitos, as ações e classificando a gravidade, probabilidade e detectabilidade (Kmenta& Koshuke, 2004).
Root Cause Analysis (RCA) Análise da origem da causa (RCA)	attempts to find, correct or eliminate the cause of the problem as opposed to coping with obvious symptoms only (Andersen, 2006). Tenta encontrar, corrigir e eliminar as causas dos problemas ao invés de lidar apenas com sintomas óbvios (Andersen, 2006).
Fault Tree Analysis Análise da árvore de erros	is a deductive method which explains the undesired event by a logical combination of initial faults, external events in subsystems using Boolean logic (AND, OR gates), (IEC, 2006). É um método dedutivo que explica um evento indesejável através de uma combinação lógica de erros iniciais e eventos externos em subsistemas usando lógica <i>booleana</i> (AND, OR gates), (IEC, 2006).
Fishbone Diagram Diagrama <i>fishbone</i>	proposed by Ishikawa (1990) collects all causes and reasons grouped into major categories (e.g., people, material, measurements, environments). Proposto por Ishikawa (1990), coleta todas as causas e razões agrupadas em categorias maiores (por exemplo, pessoas, materiais, medições, ambientes)
Why-Because Analysis Análise das Causas-Consequências	is a more a posteriori analysis method developed for investigating causal relations between factors contributing to an accident. É mais um método de análise posterior, desenvolvido para investigar as relações causais entre os fatores que contribuem para um acidente
Poerto chart Gráfico <i>Poerto</i>	highlights the most important factors (sources) of defects according to the occurrence, cost, frequency of customer complaints or other quality criteria. This chart typically shows bars and line graphs where the bars represent the individual value of the defects in descending order and the lines show the cumulative value (Wilkinson, 2006). <i>Highlights</i> dos fatores (fontes) mais importantes de defeitos de acordo com a ocorrência, custo, frequência de reclamação dos clientes ou outros critérios de qualidade. Este gráfico mostra normalmente barras, representando o valor individual de defeitos em ordem decrescente, e linhas, que mostram o valor cumulativo (Wilkinson, 2006).
Continuous Improvement Process (CIP) Processo de	is an ongoing effort to achieve incremental improvement using feedback from measurement instruments, statistical process control, ideas from customers, operators, QC and design engineers (Imai, 1997). É uma aplicação contínua para arquivar melhorias, usando <i>feedback</i> de instrumentos

melhorias contínuas (CIP)	de medições, controle de processo estatístico, idéias de clientes, operadores, QC e engenheiros de projetos (Imai, 1997)
Design of Experiments Projeto de experimentos	is a methodology (proposed by Fisher, 1971) to gather information on the effect of some controlled treatments applied to experimental units using comparison, randomization, replication and other principles. É uma metodologia (proposta por Fisher, 1971) para coletar informações sobre o efeito de alguns tratamentos de controle aplicados em unidades experimentais usando comparação, randomização, replicação e outros princípios.

Table 8. Methodologies used for initiating the optimal action in process control

Tabela 8. Metodologias usadas para iniciar uma ação ideal no controle de processo

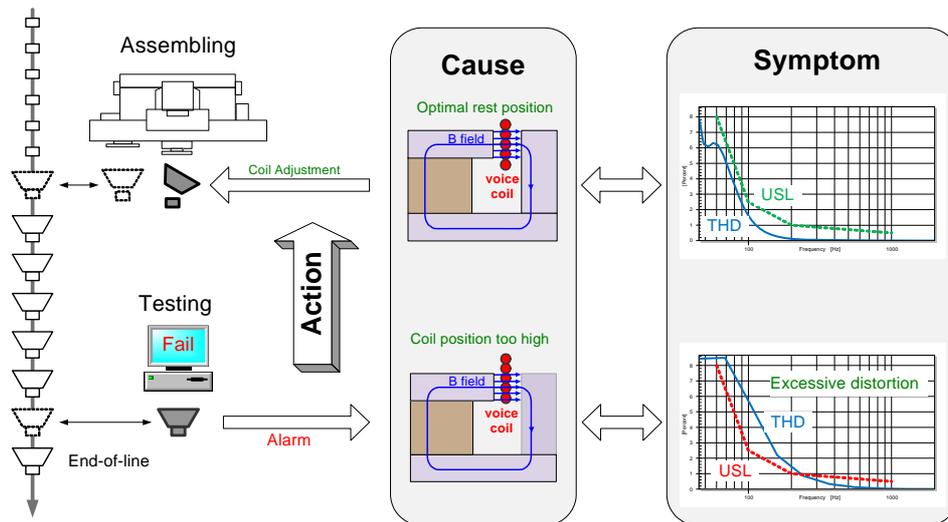


Fig. 19. Increasing the yield rate of the manufacturing process by process control (e.g., by voice coil adjustment using measured coil offset in mm using information generated during end-of-line testing)

Fig 19. Aumentando a taxa de rendimento do processo de fabricação por controle de processo (por exemplo, ajuste da bobina móvel através do deslocamento da bobina medida em mm usando a informação gerada durante o teste fim-de-linha)

The ability to act as quickly as possible when the process becomes instable and incapable is vital. The continuous improvement process (CIP) and the failure mode and effects analysis (FMEA) are examples of evolutionary methods for accumulating knowledge before a potential failure occurs. Because of practical experiences during the development of the product, the expertise of the R&D engineers is an important source. This information has to be documented in a format (e.g., fishbone diagram) and language suitable for application at the assembly line. If the manufacturing is outsourced to a contract manufacturer, this know-how will be transferred only if both companies are interested in a close and long-term relationship.

A capacidade de agir o mais rápido possível quando o processo torna-se instável e incapaz é vital. O processo de melhoria contínua (CIP), o modo de falha e a análise de efeitos (FMEA) são exemplos de métodos evolutivos para acumular conhecimentos antes que uma falha potencial ocorra. Devido a experiências práticas durante o desenvolvimento do produto, a experiência dos engenheiros de R & D é uma fonte importante. Esta informação têm que ser documentada em um formato (por exemplo, diagrama *fishbone*) e em uma linguagem adequada para aplicação na linha de montagem. Se a fabricação é terceirizada para uma fabricante de contrato, este *know-how* será transferido somente se ambas as empresas estiverem interessadas em um relacionamento estreito e a longo prazo.

New measurement techniques exploiting physical modelling of the device under test and system identification make the relationship between symptoms, causes and remedies more transparent. For example, Fig. 19 shows the adjustment of the rest position of the voice coil in loudspeaker manufacturing. The rest position of the voice coil depends on mechanical suspension which is made out of impregnated fabric, rubber, foam and other material having varying properties. An offset from the optimal rest position may cause signal distortion which impairs the perceived sound quality. However, the measurement of the total harmonic distortion (THD) is only a symptom and is less suitable for process control. Nonlinear identification techniques as discussed in Fig. 13 reveal the voice coil position and provide a quantitative value (in mm) for the adjustment of the voice coil position. The detection of a voice coil offset and a proper readjustment can be realized as continuous feedback control in automated assembly lines used for micro-speakers in telecommunication applications.

Novas técnicas de medição explorando modelagem física do dispositivo sob teste e a identificação do sistema fazem a relação entre os sintomas, causas e soluções mais transparentes. Por exemplo, a Fig 19 mostra o ajuste da posição de repouso da bobina móvel na fabricação do alto-falante, a qual depende da suspensão mecânica que é feita de tecido impregnado, borracha, espuma e outros materiais com propriedades variáveis. Um deslocamento da posição de repouso ideal pode causar distorção do sinal, prejudicando a qualidade do som percebido. No entanto, a medição da distorção harmônica total (THD) é apenas um sintoma e é menos adequado para o controle do processo. Técnicas de identificação de não-linearidades, como discutido na Fig 13, indicam a posição da bobina e fornecem um valor quantitativo (em mm) para o ajuste desta. A detecção de uma bobina móvel deslocada e um reajuste adequado podem ser realizados como controle contínuo de *feedback* em linhas de montagem automatizadas, usadas para micro-falantes em aplicações de telecomunicações.

7 Data Archiving and Reporting Arquivamento de dados e relatórios

End-of-line testing produces an enormous amount of data. This section discusses alternative ways of storing the results in an effective format to support statistical analysis and the distribution of relevant information to different recipients.

O teste fim de linha produz uma enorme quantidade de dados. Esta seção discute formas alternativas de guardar os resultados em um formato efetivo de apoio à análise estatística e à distribuição de informações relevantes para diferentes destinatários.

The results of end-of-line tests reflect the quality of the total production process and are not only interesting for manufacturing, but also for the supplier of parts, design engineers in the R&D department, QC management and customers. However, each group needs a different part of the data. For example, manufacturing should immediately receive all parameters which are the basis for process control; however, those data are less important for the customer who is more interested in the overall quality of the products. The management is usually satisfied with the number of devices tested and the process yield. The designer from the R&D department is more interested in detailed measurement results of defective devices under test to understand the physical cause of the problem and discovering clues for improving design or simplifying manufacturing. The parts supplier (e.g., diaphragms in loudspeakers) only needs parameters (e.g., resonance frequency) which are important for his quality control and to address possible customer complaints. There is usually not enough time during end-of-line testing for isolating this information and generating a separate output file for each recipient in his preferred format. This problem becomes critical if the individual results of all measured devices under test are stored to ensure traceability about every step in the process chain. In this case, each device under test is identified by bar code or printing an individual label for each device under test. The computer associated with the measurement system is only used for writing a short entry for each measured device in the log file (i.e., general information such as serial number, date, time, verdicts, Pass/Fail result and selected important single-valued parameters).

Os resultados do testes fim-de-linha refletem a qualidade do processo de produção total e não são apenas interessantes para a fabricação, mas também para o fornecedor de peças, os engenheiros de projeto no departamento de R&D, a gerência de QC e os clientes. No entanto, cada grupo precisa de uma parte diferente dos dados. Por exemplo, a fabricação deve receber imediatamente todos os parâmetros base para o processo de controle, no entanto, esses dados não são tão relevantes para o cliente, o qual está mais interessado na qualidade global dos produtos. A gerência está geralmente satisfeita com o número de dispositivos testados e o rendimento do processo. O projetista do departamento de R & D está mais interessado em resultados de medição detalhada de dispositivos defeituosos em teste para entender a causa física do problema e descobrir modos para melhorar o projeto ou simplificar a fabricação. O fornecedor de peças (por exemplo, diafragmas de alto-falantes) só precisa de parâmetros (por exemplo, frequência de ressonância) que são importantes para o seu controle de qualidade e para atender as possíveis reclamações de clientes. Geralmente não há tempo suficiente durante o teste fim-de-linha para isolar esta informação e gerar um arquivo de saída separado para cada destinatário em seu formato preferido. Este problema torna-se crítico caso os resultados individuais de todos os dispositivos medidos em teste forem armazenados para garantir a rastreabilidade de cada passo na cadeia de processos, neste caso, cada dispositivo em teste é identificado pelo código de barras ou pela impressão em etiqueta individual para cada dispositivo abaixo. O computador associado com o sistema de medição é usado apenas para escrever uma entrada curta para cada dispositivo medido no arquivo *log* (ou seja, informações gerais, tais como número de série, data, hora, decisões, resultados *Pass/Fail* e parâmetros de valor único importantes).

In many applications, a digital format (e.g., database) is the only way to transfer a large amount of data (e.g., curves) as quickly as possible to a central computer (e.g., server) where the data is stored temporarily and the output file for each recipient is generated by a

separate extraction process. The central storage of the test results allows, for example, matching loudspeaker units with similar acoustical properties which are sold as pairs to the customer.

Em muitas aplicações, um formato digital (por exemplo, banco de dados) é a única maneira de transferir uma grande quantidade de dados (por exemplo, curvas) o mais rápido possível para um computador central (por exemplo, servidor), onde os dados são armazenados temporariamente e os arquivos de saída para cada destinatário são gerados por um processo de extração separada. O armazenamento central dos resultados do teste permite, por exemplo, a combinação de unidades de alto-falante com propriedades acústicas semelhantes que são vendidas aos pares para o cliente.

8 Conclusion Conclusão

Testing the manufactured device at the end of the assembly line differs significantly from the measurements performed during the development of the product. Most information, graphs, post-processing tools appreciated by an innovative R&D engineer are less useful in manufacturing where an identical replication of the prototype is important. End-of-line testing uses highly specialized test equipment providing limited information sufficient for quality assurance and process control. New sensor, signal analysis and system identification techniques are used to ensure reliable detection of defects at an early stage before the product is shipped or mounted in the final application. Ultra-fast measurement techniques using an optimal stimulus are crucial for comprehensive testing within the available cycle time. End-of-line testing has to cope with measurement conditions which do not comply with R&D standards (e.g., anechoic room) and ensure comparability within the specification limits (e.g., transfer by Golden Reference Units). Invalid measurements caused by unavoidable disturbances in a production environment must be detected and repeated. This leads to new techniques (e.g., noise immunity) increasing the robustness of the test.

Testes com os dispositivos fabricados no final da linha de montagem diferem significativamente das medições realizadas durante o desenvolvimento do produto. Mais informações, gráficos, ferramentas de pós-processamento apreciados por um engenheiro R &D inovador são menos úteis na fabricação, onde a replicação idêntica do protótipo é importante. Nos teste fim de linha são usados equipamentos de teste altamente especializados, fornecendo informação limitada suficiente para a garantia da qualidade e do controle do processo. Novos sensores, análise de sinais e técnicas de identificação do sistema são usados para garantir a detecção confiável de defeitos em um estágio inicial antes do produto ser enviado ou montado na aplicação final. As técnicas de medição ultra-rápidas que usam um estímulo ideal são cruciais para testes abrangentes dentro do tempo de ciclo disponível. Os testes fim-de-linha precisam lidar com condições de medição que não estão de acordo com padrões R&D (por exemplo, sala anecóica) e assegurar comparabilidade dentro dos limites de especificação (por exemplo, a transferência de “Unidades de Referência de Ouro”). Medições inválidas causadas por distúrbios inevitáveis em um ambiente de produção devem ser detectadas e repetidas. Isto leva a novas técnicas (por exemplo, imunidade ao ruído), aumentando a robustez do teste.

The measured physical variables and counts provided by end-of-line testing are the basis for process control. Trends and shifts must be detected early enough to adjust the process in time and to ensure a stable and capable production process (Six sigma). Process control

requires knowledge about the relationship between causes, symptoms and actions especially at automatic lines with continuous feedback and automatic adjustment of process parameters. One source of this knowledge is physical modeling provided by product development and applied to the particular requirements in manufacturing. A second source is the off-line diagnostic where a human operator investigates defective devices and extends the knowledge base continuously. This new task will replace manual handling and subjective evaluation which cannot meet modern requirement of 100 % testing of the products manufactured by an automated assembly line.

As variáveis físicas medidas e contas fornecidas pelos testes fim-de-linha são a base para o controle do processo. Tendências e deslocamentos devem ser detectados o quanto antes para ajustar o processo a tempo de assegurar um processo de produção estável e capaz (Seis Sigma). O controle de processo requer o conhecimento sobre a relação entre causas, sintomas e ações, especialmente em linhas automáticas, com *feedback* contínuo e ajuste automático dos parâmetros de processo. Uma fonte deste conhecimento é a modelagem física fornecida pelo produto e aplicada às necessidades particulares na fabricação. A segunda fonte é o diagnóstico *off-line*, onde um operador humano investiga os dispositivos defeituosos e estende a base de conhecimento continuamente. Esta nova tarefa irá substituir a utilização de manual e a avaliação subjetiva que não pode cumprir a exigência moderna de 100% dos testes dos produtos fabricados por uma linha de montagem automatizada.

9 References Referências

- Andersen, B. (2006). *Root cause analysis : simplified tools and techniques*, ISBN-13 : 978-0-87389-892-4, American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee,.
- ASTM (2009). *Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method*. American Society for Testing and Materials (ASTM), E691-09e1.
- Bendat, J. & Piersol, A. (1980). *Engineering applications of correlation and spectral analysis*, ISBN 0-471-57055-9, New York, Wiley-Interscience, 1993.
- Boashash, B. (2003). *Time-Frequency Signal Analysis and Processing – A Comprehensive Reference*, ISBN 0-08-044335-4, Elsevier Science, Oxford.
- Cabot, R. (1999). Fundamentals of Modern Audio Measurement, *Journal of Audio Eng. Society*, Vol. 47, Number 9, Sept. 1999.
- Fisher R.A. (1971). *The Design of Experiments*, ISBN 0028446909, 9th Edition, Macmillan.
- IEC (2006). Fault Tree Analysis, Edition 2.0. International Electrotechnical Commission. ISBN 2-8318-8918-9. IEC 61025
- Imai, M. (1997). *Gemba Kaizen: A Commonsense, Low-Cost Approach to Management*, 1st edition. McGraw-Hill. ISBN 0-07-031446-2.
- Irrgang, S. et. all (2006). Loudspeaker Testing at the Production Line. *Preprint 6845 presented at the 120th Convention of Audio Eng. Society*, May 2006.
- ITU (2001). *Recommendation BS.1387: Method for objective measurements of perceived audio quality (PEAQ)*.
- Ishikawa, K. (1990). *Introduction to Quality Control*. ISBN 4-906224-61-X, Chapman and Hall, 1991.

- Klippel, W & Seidel, U. (2003). Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and other Disturbances. *Preprint 5734 presented at 114th Convention of the Audio Eng. Society*, Amsterdam March 2003.
- Klippel, W. (2006). Tutorial : Loudspeaker Nonlinearities - Causes, Parameters, Symptoms. *Journal of Audio Eng. Soc.* Vol. 54, Number 10, pp. 901-939.
- Klippel, W. & Schlechter, J. (2009). Fast Measurement of Motor Suspension Nonlinearities in Loudspeaker Manufacturing. *Journal of Audio Eng. Soc.*, Vol. 58 Issue 3, pp. 115-125, March 2010.
- Klippel, W. & Werner, R. (2010). Measurement of Turbulent Air Noise Distortion in Loudspeaker Systems, *presented at the 129th Convention of Audio Eng. Soc.*, San Francisco, November 2010, preprint 8174.
- KLIPPEL GmbH (2011), *QC System - 100 % Testing in Manufacturing*, 21.32011, Available from <http://www.klippel.de/our-products/qc-system.html>
- Kmenta, S. & Koshuke, I. (2004). Scenario-Based Failure Modes and Effects Analysis Using Expected Cost. *Journal of Mechanical Design* 126 (6): 1027, November 2004.
- Montgomery, D. (2005). *Introduction to Statistical Quality Control*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 9780471656319.
- Nelson, L. (1984). Technical Aids, *Journal of Quality Technology* 16, no. 4 (October 1984), 238-239.
- Oppenheim A. & Schafer R. (2004). From Frequency to Quefrequency: A History of the Cepstrum, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 21, Issue 5, Sept. 2004, S. 95-106
- Percival, D & Walden, A. (2000). *Wavelet Methods for Time Series Analysis*, Cambridge University Press, 2000, ISBN 0-5216-8508-7.
- WECO (1956). *Statistical Quality Control handbook*. (1 ed.), Western Electric Company, Indianapolis, Indiana: Western Electric Co., p. v, OCLC 33858387
- Wilkinson, L. (2006). Revising the Pareto Chart. *The American Statistician* 60: 332-334.
- Zadeh, L. (1987), *Fuzzy Sets and Applications, Selected Papers*. Wiley & Sons, New York, 1987.

Translated by Thais De Fusco