

COMSOL NEWS

EDIÇÃO ESPECIAL **ACÚSTICA**



Acústica Computacional Fornece uma Visão Precoce e Capacidade Preditiva na Etapa de Projeto

Quando falamos de acústica, as primeiras imagens que talvez nos venham à mente sejam as de um subwoofer potente ou de uma sala de concerto com todos os seus defletores de som. Mas há muitas outras aplicações de acústica com as quais temos contato no dia a dia. De fato, a acústica é uma ciência multidisciplinar, que exige toda a engenhosidade dos engenheiros e as mais poderosas ferramentas de modelagem matemática, de modo a criar produtos que atendam os vários requisitos dos clientes.

Esta edição especial da COMSOL News dá visibilidade a projetistas, engenheiros e pesquisadores que trabalham no campo da acústica. Como você verá ao ler suas histórias, o denominador comum entre eles é a paixão pela modelagem multifísica de alta fidelidade, flexibilidade e a capacidade de compartilhar seus trabalhos com colegas e clientes através de apps de simulação.

Do desenvolvimento virtual de produtos ao desempenho de NVH, camuflagem acústica e redução de feedback, tenho certeza que você se sentirá inspirado ao conhecer as várias formas como a acústica computacional gera soluções para problemas práticos e projetos de produtos inovadores.

Boa leitura!



Valerio Marra
Diretor de Marketing
COMSOL, Inc.

INTERAÇÃO COM A COMUNIDADE COMSOL



COMSOL, Inc.



COMSOL Multiphysics



@COMSOL_Inc



plus.google.com/+comsol

BLOG br.comsol.com/blogs

FORUM br.comsol.com/community/forums/

Convidamos você a deixar seus comentários sobre a COMSOL News; contate-nos através do e-mail info@br.comsol.com

COMSOL NEWS

2017

Edição Especial
Acústica

© 2017 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server e LiveLink são marcas registradas ou marcas comerciais da COMSOL AB. Todas as demais marcas pertencem aos seus respectivos proprietários e a COMSOL AB, assim como suas subsidiárias e seus produtos, não são afiliados, endossados, patrocinados ou apoiados por tais proprietários de marcas. Para ter a lista completa desses proprietários de marcas, acesse o site www.comsol.com/trademarks.

O logotipo IN é marca registrada ou marca comercial da LinkedIn Corporation e de suas afiliadas nos Estados Unidos e/ou em outros países. O logotipo "f" é marca registrada da Facebook, Inc. O pássaro é marca registrada da Twitter, Inc. O logotipo G+ é marca comercial da Google, Inc.

CONTEÚDO



SIMULAÇÃO ACÚSTICA

4 | Falando em Favor da Modelagem Acústica e dos Apps de Simulação

DESENVOLVIMENTO VIRTUAL DE PRODUTOS

6 | Ajustando Virtualmente um Sistema Automotivo de Áudio

MICROFONES DE ALTA PRECISÃO

9 | Desempenho com Precisão: A Busca pela Medição Perfeita

INSTABILIDADE DE COMBUSTÃO

12 | Programa Multifísico Modela Fenômenos Acústicos Aumentados por Escoamento em Sistemas de Foguetes

DESEMPENHO DE NVH

15 | Por trás do Ronco das Motocicletas Mahindra

RUÍDO DE TRANSFORMADORES

18 | Das Planilhas às Aplicações Multifísicas, a ABB Continua a Energizar o Setor de Transformadores



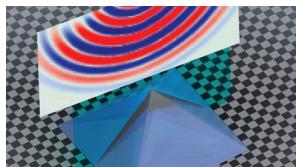
CAPA

Motocicleta Mahindra Mojo para viagens de aventura. Crédito da imagem: Mahindra Two Wheelers Ltd.

DESTAQUES

INTERAÇÃO MULTICORPO-ACÚSTICA

22 | Modelagem de Vibração e Ruído em uma Caixa de Câmbio



CAMUFLAGEM ACÚSTICA

25 | Manipulação e Controle do Som: Como a Modelagem Matemática dá Suporte à Pesquisa de Metamateriais Acústicos de Ponta



VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR INFRASSOM

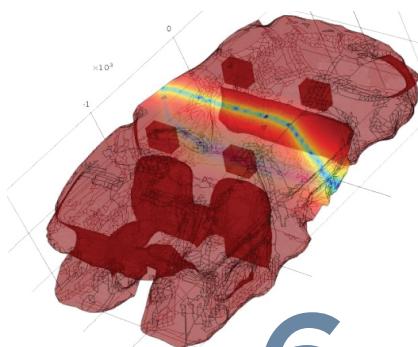
28 | Combatendo as Vibrações Incômodas

REDUÇÃO DO RETORNO

30 | Na Vanguarda da Pesquisa de Aparelhos Auditivos

TECNOLOGIA ACÚSTICA NÃO INVASIVA

33 | A Análise Multifísica Aprimora a Detecção de Vazamentos em Adutoras



TRANSDUTORES DE ALTA PRECISÃO

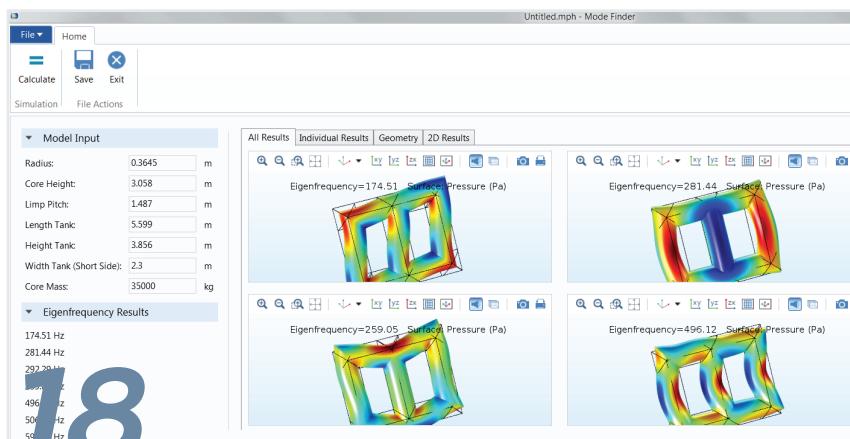
36 | Música Para Seus Ouidos: Novos Transdutores Para Fones de Ouvido Eletrostáticos

MODELAGEM MULTIFÍSICA

39 | Simulando o Mundo Através das Lentes da Multifísica

EDITORIAL DO CONVIDADO

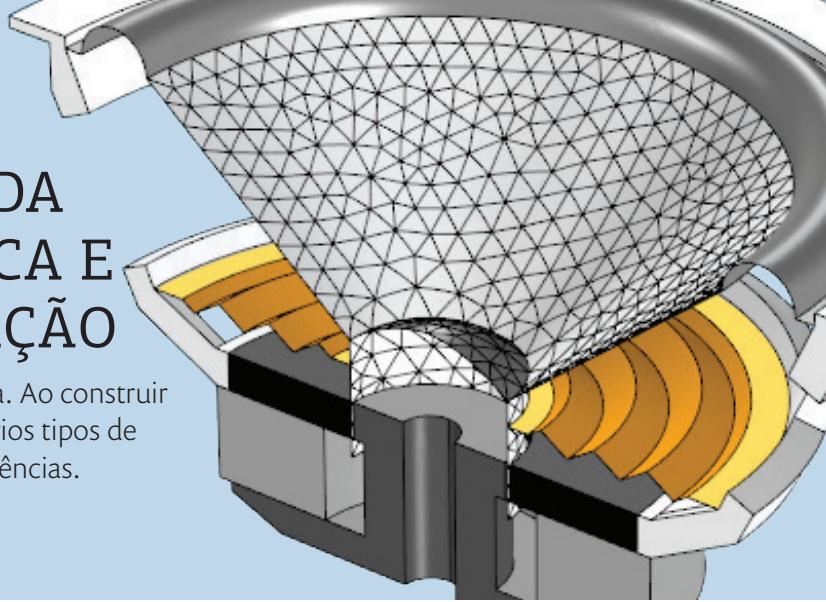
40 | Como a Acústica Computacional se Beneficia com a Multifísica



FALANDO EM FAVOR DA MODELAGEM ACÚSTICA E DOS APPS DE SIMULAÇÃO

Fenômenos acústicos são multifísicos por natureza. Ao construir um modelo, os engenheiros devem considerar vários tipos de física e sua interação em diferentes escalas e frequências.

por **MADS J. HERRING JENSEN**



Com sistemas sempre mais complexos e prazos de projeto mais restritos, os engenheiros acústicos estão recorrendo ao software de simulação numérica para fazer seu trabalho. Usando ferramentas computacionais, pode-se acelerar as tarefas de projeto e reduzir a necessidade de protótipos físicos caros e demorados. A simulação acústica também eleva o conhecimento sobre uma concepção, levando a decisões mais bem informadas e produtos de maior qualidade.

Para obter esses benefícios, quais recursos são importantes na simulação acústica? Em geral, as aplicações incluem reprodução, propagação e recepção de sinais sonoros sob diversas condições. Isto inclui não apenas a interação do sinal sonoro com estruturas, materiais porosos e escoamento, mas, também, a modelagem dos transdutores envolvidos na geração e detecção dos sinais sonoros. São todos problemas de multifísica por natureza, que os engenheiros de acústica devem considerar para um desenvolvimento eficiente de novos produtos e tecnologias. Isto impõe requisitos críticos ao software de modelagem, em termos da capacidade de acoplar efeitos físicos relevantes para todo o sistema.

⇒ OS ATUAIS DESAFIOS TECNOLÓGICOS EM ACÚSTICA

A qualidade sonora é uma tendência em vários setores. Isto envolve a reprodução do som no interior de automóveis (Figura 1), por exemplo, ou a saída dos sistemas de escapamento e silencioso. Outros exemplos incluem desempenho e otimização de fones de ouvido e alto-falantes ou o sistema de reprodução sonora de dispositivos móveis. Em todos esses casos, uma compreensão detalhada, tanto da propagação sonora

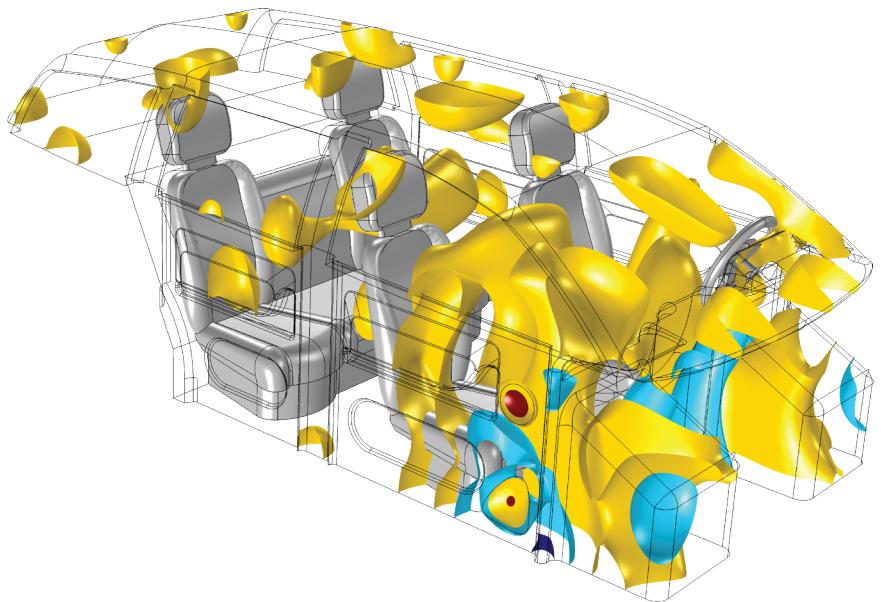


FIGURA 1. Simulação acústica no interior de um sedã, incluindo fontes sonoras nos locais típicos para alto-falantes. Os resultados mostram o campo de pressão acústica total no interior da cabine.

como do comportamento de transdutores, é necessária para se otimizar os sistemas. O processamento inteligente de sinais digitais já não é mais suficiente para fazer com que os sistemas tenham um bom comportamento sonoro. Assim, por exemplo, para elevar o desempenho de aparelhos auditivos utilizando cancelamento adaptativo de feedback, é preciso ter o acoplamento do modelo vibroacústico de um alto-falante em miniatura com um modelo acústico-estrutural de elementos finitos (EF) para gerar resultados de simulação precisos.

No setor de alto-falantes, o padrão dominante de projeto chegou ao limite onde aperfeiçoamentos podiam ser efetuados por simples testes de tentativa e erro (Figura 2). A

otimização requer uma detalhada análise numérica. Os sistemas de alto-falantes em miniatura são, agora, excitados com níveis de pressão sonora tão elevados que distorções e atenuações devido a não-linearidades começam a aparecer. Essas mesmas não-linearidades têm um papel significativo em revestimentos, no caso de aplicações aeroespaciais.

Outro exemplo que envolve um acoplamento multifísico — eletrostática, membranas estruturais e acústica termoviscosa — é a modelagem dos microfones capacitivos. Todas as físicas estão fortemente acopladas e são necessárias para uma previsão correta da sensibilidade desses microfones.



FIGURA 2. Resultados de simulação mostrando a distribuição de pressão sonora em uma caixa acústica.

⇒ COMSOL MULTIPHYSICS E O ACOUSTICS MODULE

O Acoustics Module, um item adicional do software COMSOL Multiphysics®, é ideal para modelar as várias bandas de frequência envolvidas em acústica, do infrassom ao ultrassom, assim como a natureza multiescalar da acústica ao lidar com (entre outras coisas) mecanismos de perdas termoviscosas ou aeroacústica. Os

recursos de simulação acústica do software incluem acoplamentos multifísicos integrados e de fácil utilização entre as diferentes físicas, que são facilmente configurados no mesmo ambiente de modelagem, enquanto o Acoustics Module acrescenta inúmeras formulações especializadas das equações que regem a acústica.

⇒ APPS DE SIMULAÇÃO ACÚSTICA

Para vencer os desafios acústicos enfrentados por muitos do setor, usuários sem experiência anterior em programas de simulação podem executar apps feitos especificamente sob medida para eles e suas necessidades, com entradas predefinidas e saídas desejadas. Isto é possível usando apps criados com o Application Builder, disponível com o software COMSOL Multiphysics. Os apps de simulação são modelos multifísicos pré-configurados que possuem uma interface de usuário personalizada. Com essa ferramenta, os especialistas podem montar uma simulação complexa e permitir que os usuários mudem parâmetros de projeto e analisem os resultados de modo autônomo, conforme os padrões de cada setor e requisitos de clientes.

Graças à instalação local do produto COMSOL Server™, pode-se disponibilizar os apps facilmente para colegas e clientes,

em toda uma empresa ou mesmo em nível mundial. Os usuários podem se conectar através do COMSOL Client ou algum dos principais navegadores de Internet. Nunca foi tão fácil para os especialistas em simulação modelar dispositivos acústicos com esse elevado nível de fidelidade e permitir que os colegas se beneficiem de seu trabalho. ❖

INTERFACES FÍSICAS DISPONÍVEIS NO ACOUSTICS MODULE

Pressure Acoustics: O campo sonoro é descrito por variações acústicas em torno da pressão estática ambiente. É possível modelar materiais porosos e fibrosos, estruturas estreitas e comportamento de absorção volumétrica. PMLs (Perfectly Matched Layers) estão disponíveis para truncar domínios infinitos.

Acoustic-Structure Interaction: Permite modelar fenômenos onde a pressão do fluido produz um carregamento no domínio sólido e a aceleração estrutural afeta o domínio do fluido através da fronteira fluido-sólido. Estão incluídos materiais piezoelétricos, ondas elásticas e poroelásticas e acústica de tubulações.

Aeroacoustics: Aborda a interação unilateral do escoamento de um fluido de fundo com um campo acústico.

Thermoviscous Acoustics: Permite modelar a acústica com precisão em geometrias de pequenas dimensões, onde é importante o efeito da camada limite viscosa e térmica próximo às paredes.

Ultrasound: Aborda problemas de grandes transientes acústicos lineares com vários comprimentos de onda em um campo de escoamento estacionário de segundo plano.

Geometrical Acoustics: Permite modelar a acústica no limite de alta frequência, onde o comprimento de onda é significativamente menor que os detalhes geométricos.

RECURSOS

- Blog da COMSOL
- Galeria de vídeos da COMSOL
- Galeria de aplicativos da COMSOL

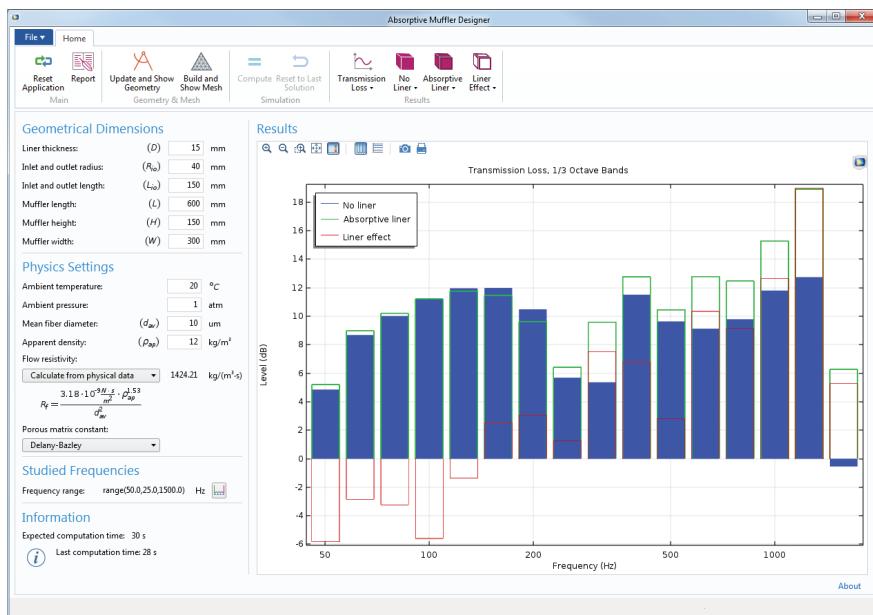


FIGURA 3. Este exemplo de aplicativo baseia-se em um modelo do COMSOL Multiphysics® de um silencioso absorvedor. O usuário pode alterar o projeto geométrico do silencioso, a temperatura e a pressão ambientes e as propriedades do material, a fim de avaliar o comportamento acústico resultante.

AJUSTANDO VIRTUALMENTE UM SISTEMA AUTOMOTIVO DE ÁUDIO

Os especialistas da HARMAN estão utilizando experimentos físicos juntamente com modelagem matemática e simulação numérica para aprimorar o processo de desenvolvimento da mais recente tecnologia de infotainment para veículos.

por **JENNIFER HAND**



FIGURA 1. Posicionamento do alto-falante no interior de um veículo.

Os veículos atuais oferecem incríveis possibilidades de entretenimento eletrônico, desde conectividade com smartphones a displays interativos e telas de vídeo. A HARMAN é líder de mercado em tais configurações de veículos conectados, equipando mais de 80% dos carros de luxo com sistemas de áudio de alto nível.

Cada modelo de veículo requer uma configuração própria e a equipe de especialistas em acústica e simulação da HARMAN assegura que os diferentes componentes e a acústica do automóvel sejam considerados no processo de projeto. De fato, detalhes como posicionamento e orientação ideais dos alto-falantes, encapsulamento dos alto-falantes e geometrias adjacentes, tais como portas dos carros, afetam a qualidade sonora.

A equipe utiliza experimentos físicos juntamente com análise numérica para acelerar o desenvolvimento de produtos, a fim de "ajustar" virtualmente os sistemas antes mesmo de criar um protótipo físico. Isto poupa tempo com testes físicos e permite que os testes virtuais substituam medições in loco, de modo que a equipe possa projetar seus produtos antes mesmo que o projeto final do veículo seja concluído.

"É normal que sejamos envolvidos logo no início do processo de desenvolvimento de um veículo, quando os projetistas ainda não decidiram o que será exigido do sistema de áudio", explicou Michael Strauss, Gerente Sênior de VPD (Virtual Product

Development and Tools) da HARMAN. "Ou podemos ter apenas detalhes básicos, tais como tamanho e volume do compartimento de passageiros. Mesmo assim, é comum termos que apresentar um conceito em poucos dias, o que gera um desafio complexo para atender os requisitos do cliente e oferecer sistemas de alta qualidade."

⇒ SIMULAÇÃO E EXPERIMENTOS JUNTAM-SE PARA SATISFAÇÃO DO CLIENTE

Para oferecer uma resposta rápida e precisa aos clientes, os engenheiros da HARMAN recorrem à modelagem matemática no software COMSOL Multiphysics®.

“Tínhamos necessidade de recursos de simulações mecânicas, acústicas e elétricas em um só ambiente integrado e queríamos um programa que pudesse poupar tempo e esforço despendidos com a criação e a atualização de nossas próprias ferramentas.”

"Tínhamos necessidade de recursos de simulações mecânicas, acústicas e elétricas

em um só ambiente integrado e queríamos um programa que pudesse poupar tempo e esforço despendidos com a criação e a atualização de nossas próprias ferramentas", afirma François Malbos, Engenheiro-chefe de Acústica da HARMAN.

Segundo Michal Bogdanski, Engenheiro de Simulação e Líder de Projeto da HARMAN, "A abordagem multifísica é uma das partes mais importantes do processo de desenvolvimento virtual de produtos. Podemos explorar como o comportamento acústico de um alto-falante tem relação com qualquer parte da estrutura de um veículo — como a rigidez de uma porta, por exemplo — para então fornecer orientações sobre o projeto de portas ao nosso cliente."

Em um dos casos, a equipe mediu e simulou os níveis de pressão sonora gerados por um alto-falante na cabine de um modelo Mercedes-Benz ML (Figura 1), a fim de validar seus modelos numéricos e depois utilizá-los para otimizar o equipamento acústico. "As simulações em cabines de automóveis estão entre as mais difíceis de realizar, pelo fato de abrangerem muitas áreas diferentes da física", explicou Strauss. Felizmente, o software da COMSOL® oferece

opções para acoplar os efeitos acústicos, mecânicos e elétricos por todo o sistema.

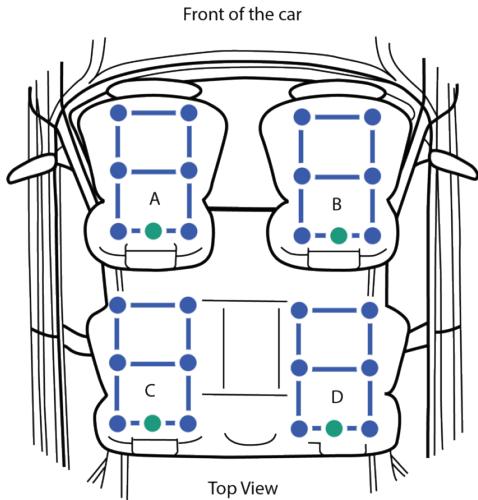


FIGURA 2. À esquerda, vista superior do arranjo de microfones nos quatro locais diferentes.

Para dar suporte aos esforços de engenharia em toda a empresa, a equipe de Strauss estabeleceu uma biblioteca de modelos validados e soluções conhecidas, que permite prever o desempenho de uma ampla gama de configurações de alto-falantes. "Temos condições de oferecer tudo, desde uma análise de tendências de alto nível até um projeto detalhado que analisa o desempenho de um subsistema", continua.

⇒ ANALISANDO O DESEMPENHO DE ALTO-FALANTES AUTOMOTIVOS

Em um de seus estudos, os engenheiros da HARMAN utilizaram o software COMSOL para criar a simulação do sistema de som de uma cabine de automóvel, a fim de otimizar a acústica dos alto-falantes, especificamente para as ondas sonoras de baixa frequência. Eles conceberam, então, uma série de testes para validar o modelo. Uma vez validado, esse modelo permitiria que a equipe da HARMAN obtivesse a melhor configuração de alto-falantes para um determinado veículo.

Nos testes de validação, um

alto-falante foi montado em uma caixa rígida, próxima ao assento do motorista. Quatro jogos de arranjos de microfones em todo o compartimento permitiram medir os níveis médios de pressão sonora em cada local (veja a Figura 2).

Nas frequências abaixo de 1 kHz, o alto-falante foi representado como um pistão plano e rígido, acoplado a um LPM (modelo de parâmetros concentrados) simplificado, levando-se em conta a tensão elétrica nos terminais da bobina e a rigidez tanto da suspensão como da superfície da membrana desse alto-falante. A geometria foi gerada a partir de uma varredura manual em 3D (veja a Figura

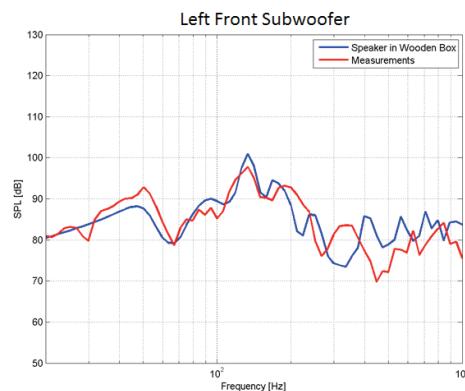


FIGURA 5. Níveis de pressão sonora para um arranjo de microfones (esquerda) e em toda a cabine (direita).



FIGURA 3. Varredura em 3D da cabine do veículo, feita pela HARMAN.

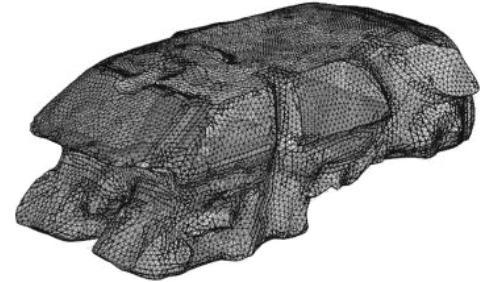


FIGURA 4. Malha de superfície para a cabine do veículo.

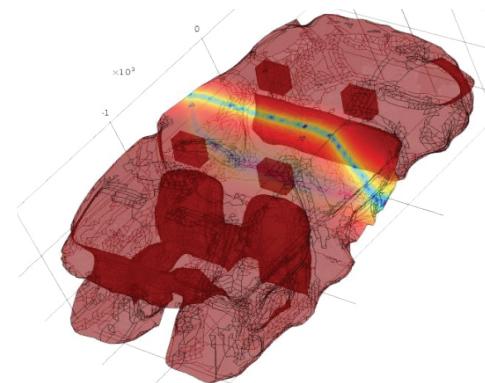
3). Usando um algoritmo de pós-processamento implementado no software MATLAB® e um item adicional do programa COMSOL®, denominado LiveLink™ for MATLAB®, que cria um vínculo bidirecional entre os dois programas, a equipe converteu a nuvem de pontos gerada pela varredura em uma malha de superfície da cabine desse veículo (veja a Figura 4) e criou uma malha otimizada para estudar as ondas de pressão acústica.

A simulação analisou a interação das ondas sonoras geradas por um alto-falante com os diferentes materiais do para-brisa, piso, assentos, apoios de cabeça, volante e com outras seções, tais como teto, portas e painéis de instrumentos — cada uma delas com diferentes propriedades de absorção.

⇒ OTIMIZANDO O MODELO ACÚSTICO

Além de considerar muitos materiais diferentes, a equipe definiu ainda o movimento e a aceleração da membrana do alto-falante, com base no volume da caixa acústica, utilizando o programa LiveLink™ for MATLAB®, e desenvolveu, então, scripts do MATLAB® para simplificar as atividades de pré-processamento e pós-processamento.

"Tudo é plenamente otimizado e automatizado, para não precisarmos calcular a aceleração para cada caso; quando uma



simulação termina, a seguinte começa", explicou Michal Bogdanski. "Isto garante que todo o processo seja simples e sem erros; simplesmente deixamos que os scripts sejam executados."

A equipe otimizou ainda os coeficientes de absorção dependentes da frequência, necessários para se obter uma estreita correlação entre as pressões sonoras medidas e simuladas. Em seguida, a análise forneceu os níveis de pressão sonora provenientes de cada arranjo de microfones (veja a Figura 5).

⇒ AVALIAÇÕES OBJETIVAS E SUBJETIVAS NO ASSENTO DO MOTORISTA

Utilizando suas simulações validadas, a HARMAN tem condições de desenvolver um sistema de som, mesmo que o veículo ainda esteja em fase de projeto. A previsão exata do campo de pressão sonora por toda a cabine do veículo permite otimizar o desempenho dos sistemas de som. Equalizadores e efeitos psicoacústicos também estão incluídos em seu algoritmo de ajuste, viabilizando alterações de projeto sem a necessidade de protótipos físicos.

A auralização (ou geração de som a partir de acústica processada virtualmente em computador) é de interesse na busca por um sistema de som de alta qualidade. Empregando um fone de ouvido de nível superior, os engenheiros da HARMAN desenvolveram um sistema de reprodução sonora que permite ouvir, avaliar e comparar sistemas de áudio, incluindo alto-falantes de frequências baixas, médias e altas (ou seja, subwoofers, midranges e tweeters). "Tudo baseado em resultados de simulações e processamento de

sinais", disse Malbos.

Os engenheiros da HARMAN incluíram efeitos da cabeça, do tronco e dos canais auditivos de seres humanos sobre a acústica, na previsão de BRIR (Respostas Impulsivas Binaurais) — ou seja, como os ouvidos recebem os sons. Para capturar o som real em 3D, as BRIR são computadas com várias posições da cabeça no plano de azimute. O sistema de reprodução utiliza um seguidor de posição da cabeça, para reproduzir perfeitamente a experiência sonora da perspectiva de quem ouve — ou seja, no assento do motorista.

A Figura 6 ilustra a malha criada pelo software COMSOL® utilizado na previsão das BRIR. A Figura 7, por sua vez, mostra uma comparação entre as BRIR medidas e simuladas.

A auralização não deixa de apresentar seus desafios. A qualidade de auralização, que é inerentemente subjetiva, deve ser comparada à audição do mundo real. Dessa forma, realizam-se medições subjetivas, para assegurar a qualidade da experiência sonora.

A capacidade da HARMAN de avaliar um sistema de áudio com base apenas em simulação elevou a qualidade dos produtos e a rapidez de seu desenvolvimento. Ela melhorou também a reação dos clientes e reduziu o custo das correções de projeto, promovendo uma sensação de liberdade de projeto entre os engenheiros.

"A beleza da simulação está no fato de que um engenheiro de sistemas possa sentar à sua mesa, colocar um fone de ouvido e começar o ajuste de um sistema sem a presença do veículo", afirma Strauss. "Com o uso da simulação, os engenheiros da HARMAN têm condições de avaliar, otimizar, prever e julgar subjetivamente o desempenho de um sistema de som proposto, mesmo que ele ainda não exista." ❖

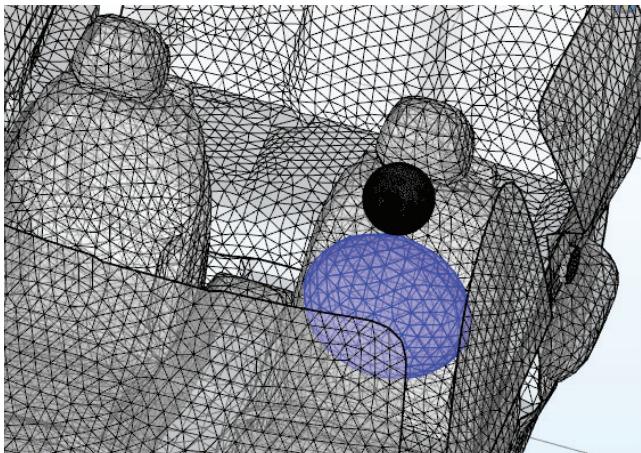


FIGURA 6. Malha criada pelo software COMSOL®, usada para prever respostas impulsivas binaurais (ou seja, como os ouvidos recebem os sons).

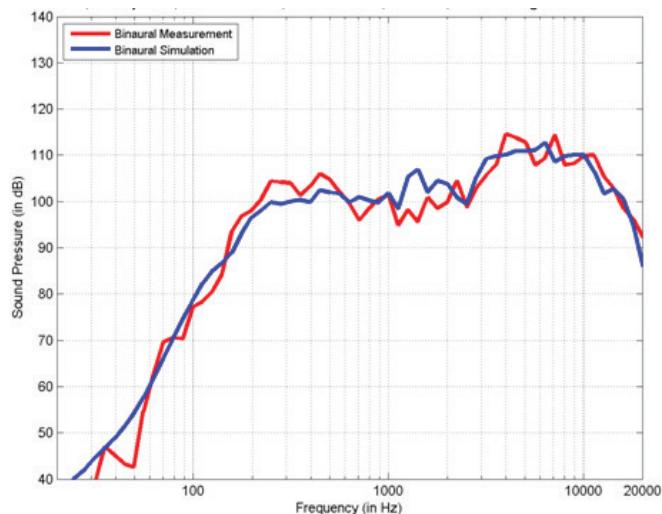


FIGURA 7. Comparação entre BRIR medidas e simuladas no domínio da frequência.



A equipe de VPD da HARMAN é composta por Maruthi Srinivasarao Reddy, Michal Bogdanski, Michael Strauss, Ninranjan Ambati e François Malbos.

Desempenho com Precisão: A Busca pela Medição Perfeita

Os pesquisadores da Brüel & Kjær estão usando simulação para obter novos níveis de precisão e exatidão para seus microfones e transdutores industriais e de alta precisão.

por **VALERIO MARRA**

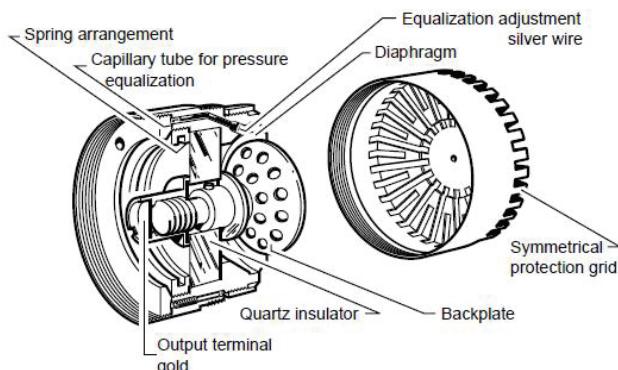


FIGURA 1. Esquerda: Foto de um microfone 4134, incluindo a grade de proteção montada sobre o diafragma. Direita: Vista em corte de uma cápsula típica de microfone, mostrando seus componentes principais.

Nunca será possível fazer uma medição perfeita ou criar um instrumento infalível. Embora possamos confiar implicitamente nas medições que fazemos, nenhuma medição será sem falhas, já que nossos instrumentos não definem o que medem. Ao invés disso, eles reagem a fenômenos circundantes e interpretam esses dados considerando uma representação imperfeita de um padrão absoluto.

Assim sendo, todos os instrumentos exibem um grau de erro aceitável — um valor admissível em que as medições podem diferir sem negar sua usabilidade. O desafio consiste em projetar instrumentos com uma faixa de erro que seja ao mesmo tempo conhecida e consistente, mesmo durante longos períodos de tempo.

Por mais de 40 anos, a Brüel & Kjær A/S tem sido líder no campo da medição e análise de som e vibração. Seus clientes incluem empresas como Airbus, Boeing, Ferrari, Bosch, Honeywell, Caterpillar, Ford, Toyota, Volvo, Rolls-Royce, Lockheed Martin e NASA, para citar apenas algumas.

Como os desafios de som e vibração industriais diferem — do ruído de tráfego

e aeroportos à vibração do motor de veículos, ruído de turbinas eólicas e controle de qualidade da produção — a Brüel & Kjær deve projetar microfones e acelerômetros que atendam uma série de padrões diferentes de medição. Para satisfazer esses requisitos, o processo de P&D da empresa inclui simulação como uma forma de verificar a precisão e exatidão de seus dispositivos e testar concepções novas e inovadoras.

⇒ PROJETO E PRODUÇÃO DE MICROFONES DE PRECISÃO

A Brüel & Kjær desenvolve e produz microfones capacitivos que abrangem frequências dos infrassons aos ultrassons, assim como níveis que iniciam abaixo do limiar da audição e vão até a mais elevada pressão sonora sob condições atmosféricas normais. Essa gama inclui microfones para padrão de trabalho e de padrão de laboratório, além de microfones dedicados para aplicações especiais. Consistência e confiabilidade são parâmetros essenciais no desenvolvimento de todos os microfones da Brüel & Kjær.

"Empregamos simulação para desenvolver microfones capacitivos e

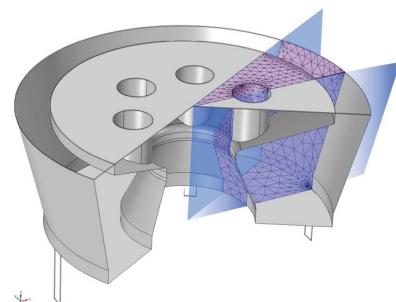


FIGURA 2. Plotagem da geometria do microfone capacitivo 4134. A figura mostra a malha utilizada na geometria de setor reduzida, representando 1/12 da geometria total.

para garantir que atendam as normas ICE (International Electrical Commission) e ISO (International Organization for Standardization)", afirma Erling Olsen, engenheiro de desenvolvimento da área de Pesquisa e Desenvolvimento de Microfones da Brüel & Kjær. "A simulação é utilizada como parte de nosso processo de P&D, juntamente com outras ferramentas, para certificar-nos de que nossos microfones atuem de modo confiável em uma ampla gama de condições. Assim, por exemplo, sabemos

com exatidão a influência da pressão estática, temperatura e umidade, assim como o efeito de outros fatores para todos os nossos microfones — parâmetros que seriam bem difíceis de medir se não fosse pelo uso de simulação."

O microfone capacitivo tipo 4134 da Brüel & Kjær mostrado na Figura 1 é um modelo antigo, que foi submetido a várias investigações teóricas e práticas ao longo do tempo. Portanto, esse microfone foi empregado como protótipo para o desenvolvimento de modelos multifísicos dos microfones capacitivos da Brüel & Kjær. Para analisar o desempenho do microfone, as simulações de Olsen incluem o movimento do diafragma, as interações eletromecânicas das deformações da membrana com a geração de sinais elétricos, a frequência de ressonância e as perdas visco e termo-acústicas que ocorrem nas cavidades internas do dispositivo.

⇒ **MODELAGEM DE MICROFONES**

Quando o som entra em um microfone, as ondas de pressão sonora induzem deformações no diafragma, que são medidas como sinais elétricos. Esses sinais são então convertidos em decibéis acústicos. "A modelagem de um microfone envolve a solução de problemas com malhas móveis, além de problemas mecânicos, elétricos e acústicos estreitamente acoplados — algo que não pode ser feito sem a multifísica", disse Olsen. "Os modelos devem ser bem detalhados porque, em muitos casos, grandes relações de aspecto (devido ao formato dos invólucros de microfones) e pequenas dimensões fazem com que perdas térmicas e viscosas tenham um papel importante no desempenho do microfone."

Pode-se usar o modelo também para prever as interações que ocorrem entre a placa traseira e o diafragma. Entre outras coisas, isto também influencia as características direcionais do microfone. "Usamos simulação para analisar a padrão de curvatura do diafragma", afirma Olsen. Em simulações como as do esforço térmico e da frequência de ressonância, adotou-se a simetria do modelo para reduzir o tempo de cálculo (veja a Figura 2). Utilizou-se ainda o modelo reduzido para analisar o nível de pressão sonora no microfone, no caso de sons que estão em uma incidência normal com relação ao diafragma (veja a Figura 3). No entanto, quando o som entra

no microfone em uma incidência anormal, a membrana é submetida a uma condição de contorno assimétrica. Isto requer uma simulação que considere toda a geometria, de modo a capturar com precisão a curvatura dessa membrana (veja a Figura 4).

Utilizou-se simulação também para determinar a influência do respiro de ar no microfone, no caso da medição de sons de baixa frequência. "Modelamos o microfone tanto com o respiro exposto ao campo sonoro externo como fora desse campo (não exposto) e até sem respiro", explicou Olsen. "Embora o último caso não ocorra na prática, nos permitiu determinar a interação entre a configuração do respiro e os resultados da resistência de entrada para diferentes comportamentos em baixa frequência. Este é um dos aspectos mais importantes da simulação: Podemos alterar os parâmetros de um modelo diferente dos dispositivos já produzidos, o que nos permite testar outras concepções e explorar os limites desse dispositivo (veja a Figura 5)."

Ao utilizar simulação como parte do processo de P&D, Olsen e seus colegas têm condições não só de projetar e testar alguns dos principais produtos da Brüel & Kjær, como também criar dispositivos com base em requisitos específicos de clientes.

"Com a simulação podemos encontrar, com precisão, abordagens que permitam fazer aperfeiçoamentos específicos, com base em necessidades dos clientes. Embora a acústica de um microfone seja bem difícil de medir somente através de testes, após

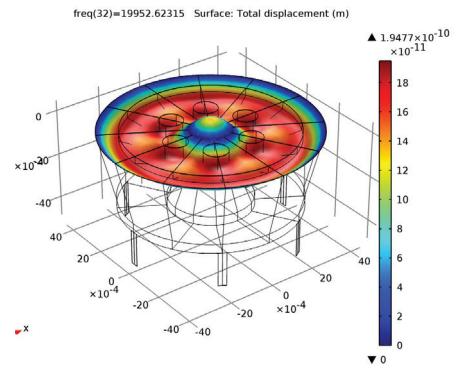


FIGURA 3. Representação do nível de pressão sonora abaixo do diafragma no caso de incidência normal, calculado usando o setor simétrico da geometria. A deformação da membrana é avaliada para $f = 20$ kHz.

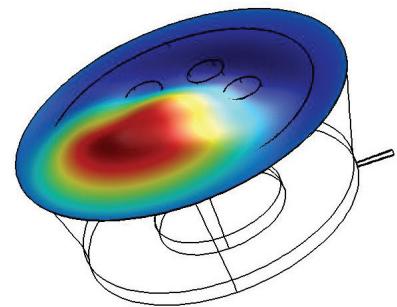


FIGURA 4. Resultados de simulação mostrando a deformação da membrana, calculada com incidência oblíqua para 25 kHz. Por ser uma deformação assimétrica, ela é calculada utilizando-se o modelo 3D completo.

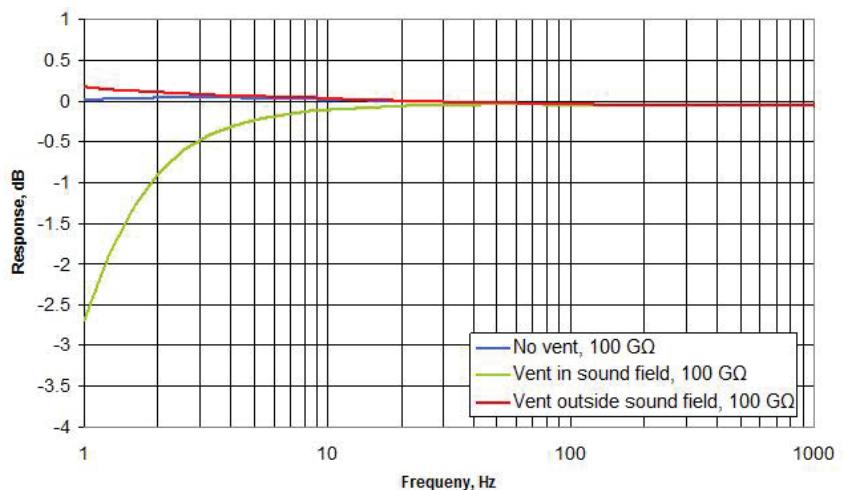


FIGURA 5. Na configuração sem respiro, a elevação de sensibilidade deve-se ao fato de que o campo sonoro se torna puramente isotérmico no interior do microfone, em frequências baixíssimas. Na configuração com respiro fora do campo sonoro, a curva segue inicialmente a curva sem respiro, mas a sensibilidade aumenta ainda mais, à medida que o respiro começa a liberar pressão na parte traseira do diafragma.

validar nossas simulações contra um modelo físico para uma determinada configuração, temos condições de usar a simulação para analisar outras configurações e outros ambientes para cada caso."

⇒ MODELAGEM DE TRANSDUTORES DE VIBRAÇÃO

Søren Andresen, engenheiro de desenvolvimento da Brüel & Kjær, também utiliza simulação para projetar e testar modelos de transdutores de vibração.

"Um dos problemas com o projeto de transdutores para análise de vibração refere-se aos ambientes hostis que esses dispositivos devem suportar", disse Andresen. "Era nosso objetivo criar um dispositivo com uma resistência integrada grande o suficiente para suportar esses ambientes extremamente hostis."

A maioria dos sistemas mecânicos tende a exibir frequências de ressonância confinadas a uma faixa relativamente estreita, normalmente entre 10 e 1000 Hz. Um dos aspectos mais importantes do projeto de transdutores é que o dispositivo não tenha uma frequência de ressonância que coincida com a das vibrações a medir, pois isto iria interferir nos resultados da medição. A Figura 6 mostra o deslocamento mecânico de um transdutor de vibração suspenso, assim como a plotagem da frequência de ressonância desse dispositivo.

"Queremos que o transdutor tenha uma resposta plana e uma frequência de ressonância que não esteja na gama de vibrações sob medição", afirma Andresen. "Utilizamos o software COMSOL para testar diferentes concepções, a fim de determinar a combinação de materiais e geometria que fornecesse um perfil plano (sem ressonância) para um determinado modelo. Essa é a região em que o transdutor será usado."

Ao projetar um transdutor, pode-se empregar um filtro passa-baixas (ou filtro mecânico) para remover os sinais indesejáveis gerados pela ressonância do

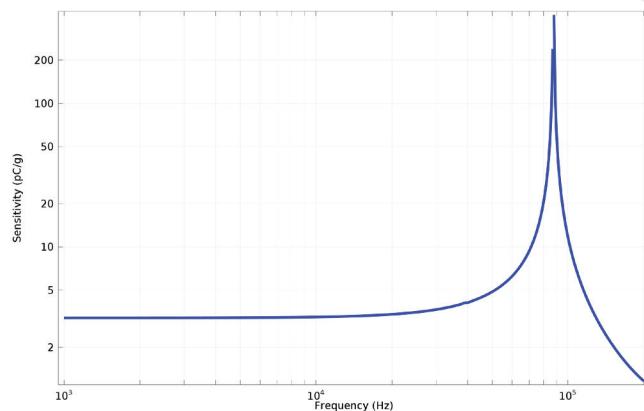
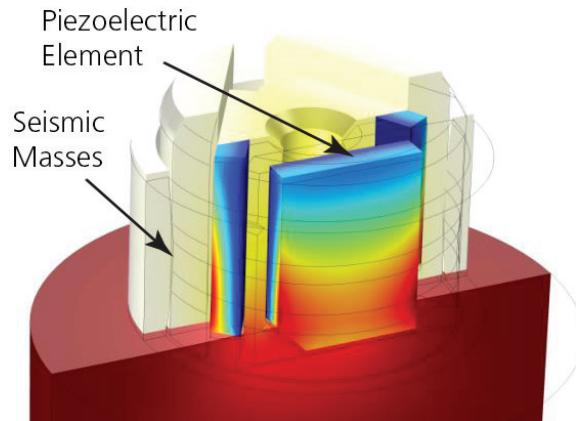


FIGURA 6. Resultados da simulação de um transdutor piezoelétrico de vibração suspenso. Parte superior: Deformação mecânica e campo elétrico no elemento sensor piezoelétrico e massas sísmicas. Para inferior: Curva de resposta mostrando a primeira ressonância do transdutor, ao redor de 90 kHz. Deve-se então usar esse dispositivo para medir objetos em frequências bem inferiores a 90 kHz.

próprio transdutor, se houver. Esses filtros consistem de um meio físico, geralmente borracha, unido entre dois discos de montagem e depois fixado entre o transdutor e a superfície de montagem.

"Como regra geral, definimos o limite superior de frequência como sendo um terço da frequência de ressonância do transdutor, para certificar-nos de que os componentes de vibração medidos no limite superior de frequência tenham no máximo 10% a 12% de erro", explicou Andresen.

⇒ TÃO PRECISOS E EXATOS QUANTO POSSÍVEL

Embora não seja possível criar um transdutor perfeito ou fazer medições infalíveis, a simulação torna as equipes de pesquisa e projeto mais próximas do que era possível anteriormente, permitindo que testem, de modo rápido e eficiente, novas soluções de projeto para muitos cenários operacionais diferentes.

"Para permanecer à frente da concorrência, precisamos de um conhecimento exclusivo", disse Andresen. "A simulação nos dá essa vantagem, já que podemos fazer ajustes e medições virtuais que não poderíamos determinar experimentalmente de outra forma – o que nos permite testar e otimizar projetos novos e inovadores." ❖

“Com a simulação podemos encontrar, com precisão, abordagens que permitam fazer aperfeiçoamentos específicos, com base em necessidades dos clientes”

— ERLING OLSEN, ENGENHEIRO DE DESENVOLVIMENTO DA BRÜEL & KJÆR

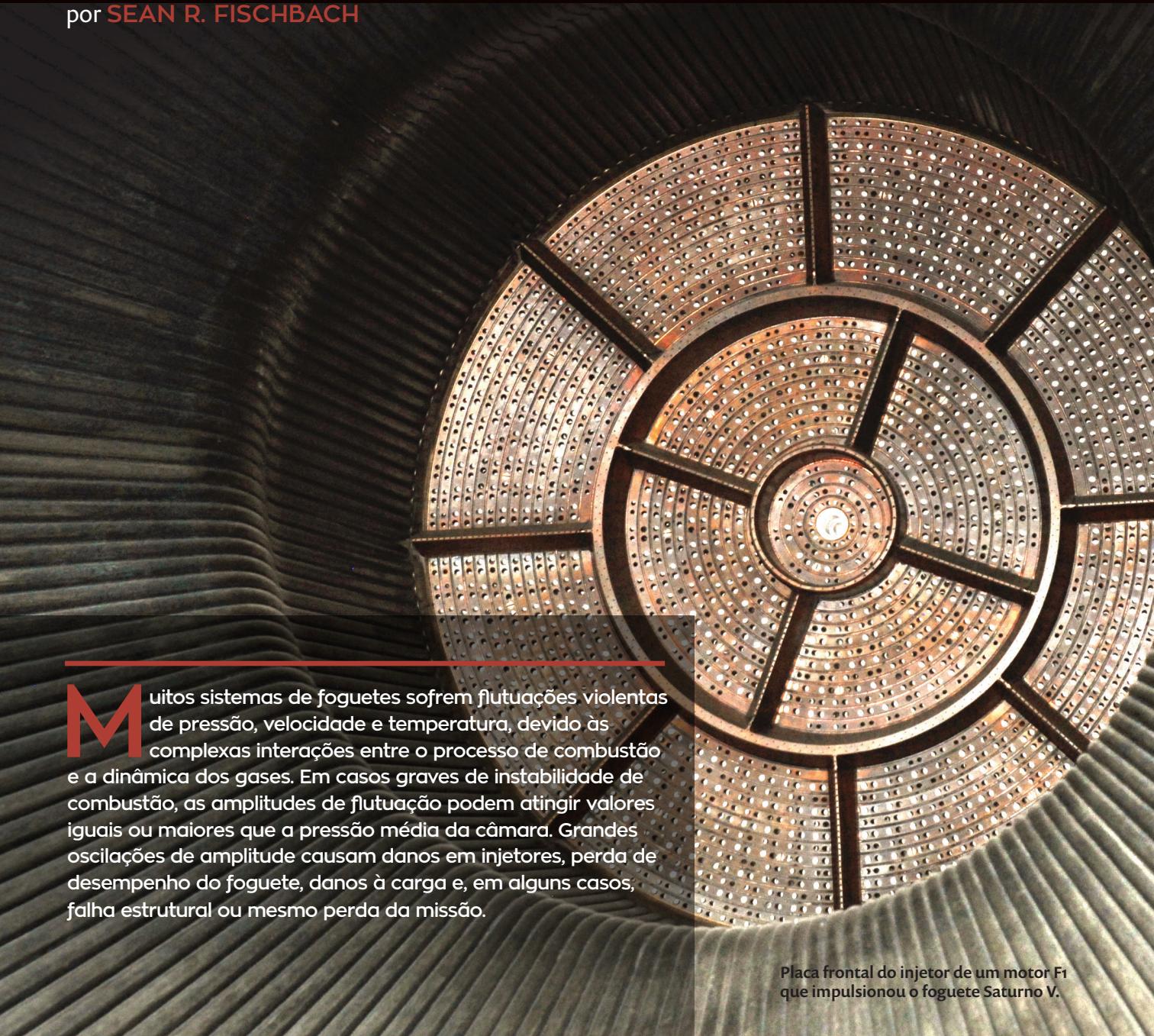
PROGRAMA MULTIFÍSICO MODELA FENÔMENOS ACÚSTICOS AUMENTADOS POR ESCOAMENTO EM SISTEMAS DE FOGUETES

A instabilidade da combustão em motores para foguetes à base de combustíveis sólidos e líquidos é um problema que continua a desafiar projetistas e engenheiros. A adoção de um princípio de modelagem de alta fidelidade, apoiada por análise multifísica, fornece maior discernimento e capacidade preditiva.

por **SEAN R. FISCHBACH**

Muitos sistemas de foguetes sofrem flutuações violentas de pressão, velocidade e temperatura, devido às complexas interações entre o processo de combustão e a dinâmica dos gases. Em casos graves de instabilidade de combustão, as amplitudes de flutuação podem atingir valores iguais ou maiores que a pressão média da câmara. Grandes oscilações de amplitude causam danos em injetores, perda de desempenho do foguete, danos à carga e, em alguns casos, falha estrutural ou mesmo perda da missão.

Placa frontal do injetor de um motor F1 que impulsionou o foguete Saturno V.



Dificuldades históricas ao se modelar e prever instabilidade de combustão reduziram a maioria dos casos de instabilidade em foguetes a um dispendioso ajuste por meio de testes (veja a Figura 1) ou ao descarte de todo o sistema.

“Pode-se obter uma descrição mais completa das oscilações da instabilidade de combustão ao se adotar uma avaliação global baseada em energia.”

No início do desenvolvimento da tecnologia de propulsão de foguetes, cientistas e engenheiros estudavam os fenômenos físicos em questão através da medição das vibrações, observação das flutuações da fumaça de exaustão e, o que é mais notável, pelos tons audíveis que acompanham as instabilidades. Essas observações levaram os pioneiros da pesquisa da instabilidade de combustão a concentrar seus esforços de modelagem em ondas acústicas dentro das câmaras de combustão.

Esse foco na acústica é bastante lógico, considerando que a frequência de oscilação medida aproxima-se frequentemente dos modos acústicos normais da câmara de combustão. Mas esse foco específico deixa de considerar contribuições das ondas rotacionais e térmicas, que são resultado direto da onda acústica ou estão muito associadas a ela. Pode-se obter uma descrição mais completa das oscilações da instabilidade de combustão ao se adotar uma avaliação global baseada em energia.

Recentes avanços na modelagem das instabilidades de combustão baseadas em energia exigem uma determinação exata de frequências acústicas e formas modais. São de particular interesse as interações entre acústica e o escoamento médio no interior da seção convergente do bocal de um foguete, onde os gradientes de pressão, densidade e velocidade tornam-se grandes. Identifica-se a expulsão de energia instável através do bocal de um foguete como a fonte predominante de amortecimento acústico para grande parte dos sistemas de foguetes.

Recentemente, uma abordagem para tratar do amortecimento do bocal com os efeitos do escoamento médio foi

implementada por French². Essa nova abordagem ampliou o trabalho originado por Sigman e Zinn³, resolvendo a equação do potencial de velocidade acústica (AVPE) formulada por meio de perturbações das equações de Euler⁴.

Determinar autovalores da AVPE, onde ψ é o potencial acústico complexo, λ corresponde aos autovalores complexos, c a velocidade do som e M é o vetor Mach,

$$\nabla^2 \psi - \left(\frac{\lambda}{c}\right)^2 \psi - M \cdot [M \cdot \nabla(\nabla \psi)] - 2 \left(\frac{\lambda M}{c} + M \cdot \nabla M\right) \cdot \nabla \psi - 2\lambda \psi \left[M \cdot \nabla \left(\frac{1}{c}\right)\right] = 0$$

é consideravelmente mais complexo que da equação de onda baseada em pressão usada tradicionalmente,

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p\right) + \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

e requer aproximações numéricas do campo de escoamento na câmara e dos autovalores.

⇒ MODELAGEM DA DINÂMICA DO GÁS NA CÂMARA

Os últimos modelos teóricos para perturbações oscilatórias em escoamentos de alta velocidade exigem uma determinação precisa dos modos acústicos da câmara. Mas antes, deve-se efetuar uma simulação das propriedades do escoamento médio na câmara de combustão.

O software COMSOL Multiphysics[®] fornece uma plataforma numérica para simular, de modo conveniente e preciso, a dinâmica do gás na câmara e a acústica interna. Esse pacote de programas de

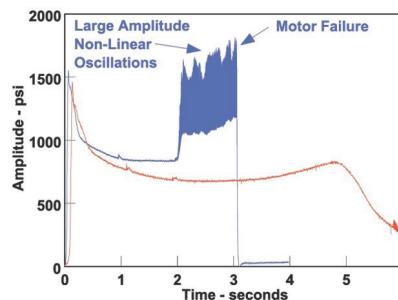


FIGURA 1. Traçado da pressão de um motor de foguete a combustível sólido quando estável (em vermelho) e quando instável (em azul)¹.

elementos finitos oferece muitas físicas predefinidas, juntamente com uma interface genérica de matemática.

Esse estudo utiliza a estrutura de elementos finitos da COMSOL para modelar os parâmetros do campo de

escoamento estacionário de um motor genérico a combustível líquido, usando a interface física High Mach Number Laminar Flow – que utiliza as equações de Navier-Stokes totalmente compressíveis para um gás ideal, juntamente com as equações de conservação de energia e massa.

Para considerar a injeção de gás quente causada pela queima do propelente, modela-se a placa frontal do injetor com um fluxo de entrada uniforme de gás propelente queimado (veja a Figura 2). Todos os outros contornos sólidos são modelados com a condição de contorno "Slip" (escoamento na parede), enquanto o plano de saída é modelado com a condição de escoamento híbrido – o que significa suporte tanto a escoamentos subsônicos como supersônicos.

Os resultados de simulação do escoamento médio são então analisados, para garantir uma solução válida e convergida. Os parâmetros do escoamento médio, tais como pressão, densidade, velocidade e velocidade do som, são necessários para se modelar a AVPE. Os valores do escoamento médio na seção convergente do bocal, próxima ao plano de estrangulamento sônico, são de interesse considerável. O plano sônico, onde o número Mach equivale a 1, cria uma barreira acústica no escoamento. Para criar uma geometria precisa para fins de análise acústica, extrai-se o plano sônico (indicado em magenta na Figura 3) da simulação do escoamento médio.

⇒ MODELAGEM DA ACÚSTICA DA CÂMARA

Utiliza-se a interface matemática Coefficient Form PDE (Equação Diferencial Parcial) do software COMSOL Multiphysics para determinar os autovalores complexos da AVPE. Os termos do escoamento médio na AVPE são fornecidos pela solução da análise do escoamento médio. A dinâmica do gás na câmara de combustão desempenha um papel importante na definição das condições de contorno para a análise acústica. No interior das seções convergente e divergente do bocal do foguete, gradientes de pressão, velocidade e densidade da câmara aumentam, teoricamente, até o infinito no plano sônico em que o número Mach equivale a 1. Após o plano sônico, as perturbações acústicas sofrem convecção com o escoamento médio, a velocidades maiores que a velocidade do som.

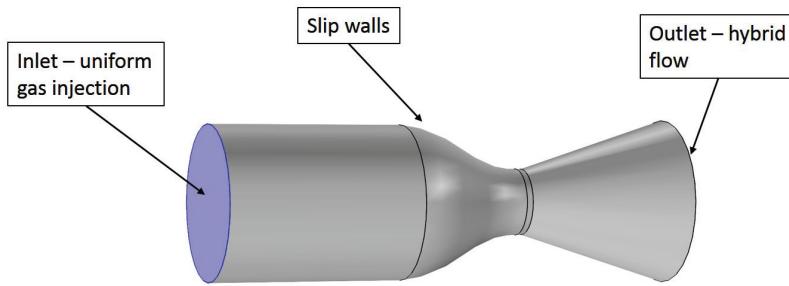


FIGURA 2. Geometria do motor a combustível líquido simulada com as condições de contorno

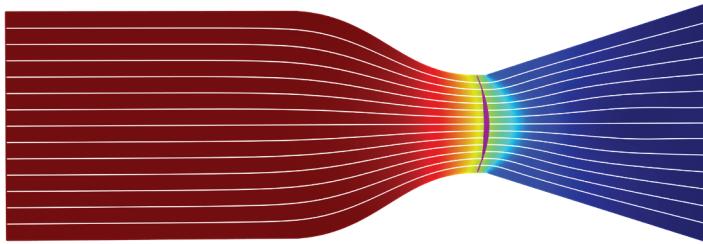


FIGURA 3. Linhas de fluxo de velocidade plotadas sobre a pressão da câmara. A superfície Mach 1 aparece em magenta.

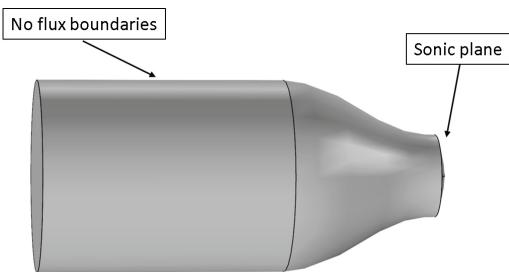


FIGURA 4. Geometria da análise acústica com as condições de contorno.

Essa condição impede que perturbações após o plano sônico propaguem-se de volta para as seções anteriores. A seção divergente da tubeira está acusticamente silenciosa e não afeta a acústica da câmara. A geometria da simulação é truncada na linha sônica do bocal, onde uma condição de contorno de fluxo zero é satisfatória por si (veja a Figura 4). Os contornos restantes são modelados com uma condição de contorno de fluxo zero, assumindo absorção acústica nula em todas as superfícies.

A análise de autovalores produz modos e autovalores complexos, representando cada modo acústico e seu conjugado complexo. A parte real do autovalor complexo representa o amortecimento temporal do modo acústico, enquanto a parte imaginária define a frequência da oscilação. Os autovetores

complexos representam a amplitude espacial e a fase da onda acústica.

Comparando os modos de vibração acústica obtidos com a equação clássica de onda homogênea (equação de Helmholtz) aos obtidos com a AVPE, pode-se ver os benefícios dos modelos de maior fidelidade – que representam corretamente a física subjacente (veja a Figura 5). O acréscimo dos termos do

escoamento médio à AVPE modela com precisão o deslocamento de fase causado pelo escoamento de gás estacionário. A sincronização de fase é extremamente importante, já que os modelos de instabilidade de combustão empregam a integração temporal e espacial dos autovetores acústicos.

A utilização do software COMSOL Multiphysics para simular a dinâmica do gás e os modos acústicos de foguetes proporciona formatos de modos mais precisos, em relação às técnicas anteriores. É possível incorporar facilmente a representação acústica de maior fidelidade aos modelos de instabilidade de combustão, de modo a oferecer maior capacidade preditiva aos projetistas e engenheiros de foguetes. A inclusão de dispositivos

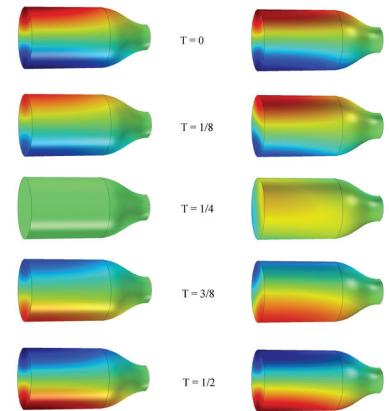


FIGURA 5. Comparação do primeiro automodo tangencial, calculado com a equação clássica de onda homogênea (à esquerda) e a AVPE (à direita) em meio período (T) de oscilação.

amortecedores (tais como defletores) ou mesmo alterações nas condições de operação, podem ser agora modeladas com maior precisão antes de quaisquer testes.

⇒ TRABALHO CONTÍNUO

Uma descrição mais completa da instabilidade de combustão inclui oscilações rotacionais e térmicas, juntamente com a acústica da câmara. As oscilações rotacionais ocorrem como resultado direto da oscilação acústica e as ondas térmicas podem estar também presentes na ausência de flutuação acústica. O trabalho contínuo com o software COMSOL Multiphysics irá se concentrar em uma abordagem à onda rotacional viscosa que acompanha todas as oscilações acústicas. ❖

Este artigo é de autoria de Sean R. Fischbach, do Marshall Space Flight Center / Grupo Jacobs ESSSA, MSFC, Huntsville, AL.

REFERÊNCIAS

1. F. S. Bloomshild, *Lessons Learned in Solid Rocket Combustion Instability*, 43rd AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-2007-5803, Cincinnati, OH, July 2007.
2. J. C. French, *Nozzle Acoustic Dynamics and Stability Modeling*, Vol. 27, Journal of Propulsion and Power, 2011.
3. R. K. Sigman and B. T. Zinn, *A Finite Element Approach for Predicting Nozzle Admittances*, Vol. 88, Journal of Sound and Vibration, 1983, pp. 117-131.
4. L. M. B. C. Campos, *On 36 Forms of the Acoustic Wave Equation in Potential Flows and Inhomogeneous Media*, Vol. 60, Applied



POR TRÁS DO RONCO DAS MOTOCICLETAS MAHINDRA

A Mahindra Two Wheelers usou simulação multifísica para atender aos requisitos regulatórios de ruído do motor de suas motocicletas de luxo de alta qualidade, e ao mesmo tempo manter a satisfação dos clientes.

por **VALERIO MARRA**

A Mahindra Two Wheelers produz uma ampla gama de motonetas e motocicletas para o mercado indiano. Graças à adoção de ferramentas de simulação numérica logo no início do ciclo de desenvolvimento, os pilotos e passageiros desfrutaram de excelente desempenho e quilometragem, com uma experiência excepcional pelas rodovias indianas. A Mahindra usa simulação multifísica para estudar o desempenho de NVH (ruído, vibração e qualidade sonora) do motor, dos sistemas de admissão e exaustão das suas motocicletas.

O conhecimento obtido a partir dos estudos de simulação numérica permitiu que os engenheiros melhorassem o projeto estrutural do motor das motocicletas até atingir os níveis de ruído desejados. "O software COMSOL nos ajudou a reduzir significativamente o número de iterações de projeto necessárias, economizando tempo," disse Niket Bhatia, Gerente Adjunto de P&D da Mahindra.

⇒ OBTENDO NÍVEIS OTIMIZADOS DE RUÍDO

Um motor tem várias fontes de ruído, incluindo os processos de admissão e combustão, pistões, engrenagens, comando de válvulas e sistemas de exaustão. O ruído de combustão se deve às vibrações

estruturais causadas pelo rápido aumento de pressão dentro dos cilindros. Essas vibrações continuam da transmissão para a carcaça do motor, através dos rolamentos, irradiando o ruído.

A análise acústica realizada apenas de forma experimental pode ser um processo caro e longo. A equipe da Mahindra decidiu complementar os testes físicos com modelagem acústica para analisar como a estrutura do motor pode potencializar a irradiação de ruído. O objetivo da pesquisa era identificar as partes do motor que geravam mais ruído e encontrar alterações estruturais que pudessem reduzi-lo.

Usando o software COMSOL Multiphysics®, os pesquisadores conduziram uma análise de radiação acústica de um motor de combustão interna (IC) com um único cilindro sob carga de combustão. Os engenheiros colocaram a carcaça do motor num domínio computacional

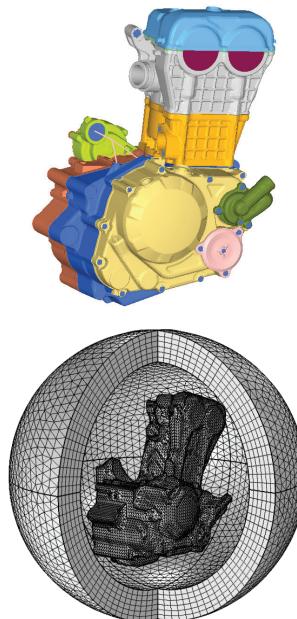


FIGURA 1. Superior: Geometria CAD do motor. Inferior: malha 3D do modelo, contida numa camada perfeitamente casada (PML).

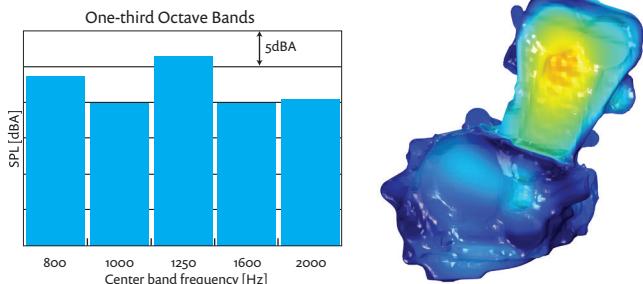


FIGURA 2. Esquerda: Gráfico da banda de terços de oitava, Direita: Gráfico 3D de superfície dos resultados de simulação de nível de pressão sonora (SPL).

cercado por uma camada perfeitamente casada (PML). A PML amortece as ondas de saída com pouca ou nenhuma reflexão (Figura 1), isso permite obter resultados precisos mesmo com domínio computacional reduzido.

A equipe decidiu focar sua análise na faixa de frequência de 800 a 2000Hz, visto que os experimentos físicos indicam que a radiação de ruído do motor da motocicleta sob carga de combustão é dominante nesta região do espectro acústico. Esta escolha permitiu que a equipe economizasse recursos computacionais e entendesse melhor que áreas irradiam mais ruído.

O nível de pressão sonora (SPL) foi estudado com base nesta análise, e foram feitas modificações no cabeçote do cilindro e no bloco, tais como aumento da altura das nervuras e da espessura da parede e fortalecimento do local de instalação (Figura 2). Ajustando estes parâmetros, o SPL foi reduzido na faixa de frequências desejada.

⇒ REDUÇÃO DO RUÍDO ESTRUTURAL DA ADMISSÃO

Tanto o ruído da admissão como o ruído da exaustão contribuem bastante para o ruído de passagem. O ruído irradiado pela estrutura do filtro de ar, normalmente feito de plástico, é um dos principais ruídos da admissão. Foi realizada uma análise de transferência acústica (ATF) das paredes de plástico do filtro de ar. A estrutura do filtro de ar foi modificada instalando-se reforços para melhorar a ATF (Figura 3). Isso ajudou a reduzir o ruído estrutural do filtro de ar (Figura 4).

⇒ ANÁLISE DA PERDA DE TRANSMISSÃO PARA MELHORAR O SOM DO SILENCIADOR

Os requisitos regulatórios sempre competem com a demanda dos clientes por um "ronco" mais alto do silenciador, pois é percebido como um importante indicador de potência da motocicleta. Dentro das restrições para o ruído de passagem, o desafio dos engenheiros da Mahindra foi aumentar o "ronco" do silenciador a baixas frequências e ao mesmo tempo reduzir o nível sonoro em altas frequências.

Apesar da função primária do silenciador ser atenuar o ruído de exaustão do motor, também é necessário considerar fatores como a capacidade de fornecer baixa contrapressão e atender à regulamentação do ruído de passagem. O desempenho do silenciador num sistema de exaustão automotivo é caracterizado por três parâmetros: perda de transmissão, perda de inserção e

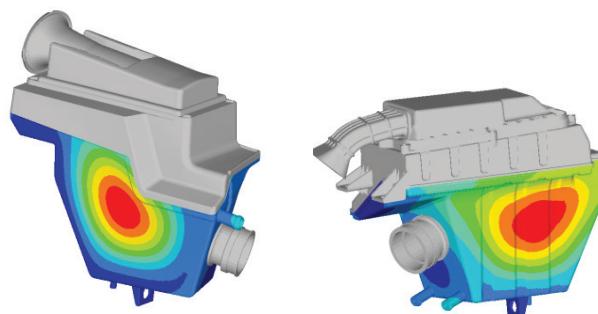


FIGURA 3. Estrutura do filtro de ar. Esquerda: Projeto original. Direita: Projeto modificado, contendo nervuras para melhorar a ATF.

níveis de ruído irradiados. O parâmetro mais importante é a perda de transmissão, determinada exclusivamente pelo projeto do silenciador e é independente da fonte de pressão. O desafio da equipe da Mahindra era prever a perda de transmissão do silenciador da motocicleta e em seguida otimizar a perda conforme os níveis desejados para uma determinada faixa de frequência.

Para a análise considerou-se o silenciador de um motor de motocicleta de um cilindro. A análise de perda de transmissão do silenciador, foi realizada usando o software COMSOL Multiphysics. Com o Acoustics Module, condições de contorno como continuidade e parede rígida para som foram aplicadas nos locais corretos.

As perfurações nos tubos foram definidas usando os detalhes de porosidade da área perfurada, usando um modelo de impedância de transferência predefinido. As entradas necessárias para realizar a análise foram a porosidade da área, espessura da flange e tubo, e o diâmetro dos furos. Para materiais porosos, tais como lã de vidro, a resistividade ao escoamento foi definida com um modelo poro-acústico disponível no software. Uma pressão unitária foi usada como entrada na admissão e foi aplicada uma condição de irradiação de onda plana nos contornos de entrada e saída.

Com base nos resultados, o projeto do silenciador foi modificado aumentando-se o comprimento do tubo dentro

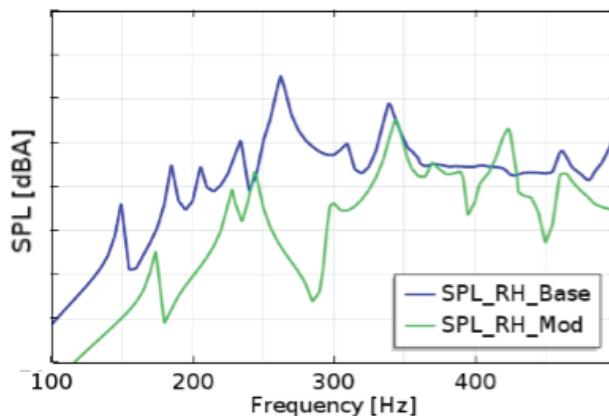


FIGURA 4. Os resultados de simulação mostram uma redução do ruído estrutural no projeto do filtro de ar modificado.

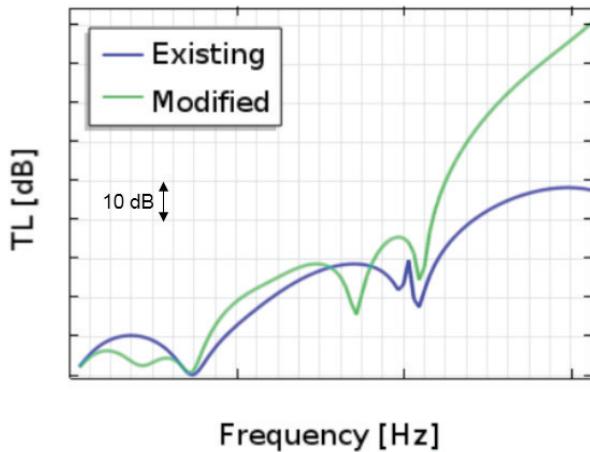


FIGURA 5. Comparação de perda de transmissão (TL) entre projetos diferentes. O projeto modificado é caracterizado pela redução de perda de transmissão a baixas frequências e aumento da perda de transmissão a altas frequências. O projeto modificado obteve o "ronco" desejado e também foi capaz de atender aos regulamentos.

do silenciador. Com o silenciador modificado, a equipe atingiu a reduzida perda de transmissão nas baixas frequências (Figura 5). Como resultado, o desejado efeito do aumento dos níveis de ruído nas baixas frequências, ou "ronco", foi atingido.

⇒ OTIMIZAÇÃO NO INÍCIO DO CICLO DE PROJETO REDUZ CUSTOS E TEMPO

"Eu, Pessoalmente, gostei muito da flexibilidade do software e das ferramentas disponíveis como a COMSOL API", disse Ulhas Mohite, gerente de P&D da Mahindra. "Ela nos permitiu automatizar o processo usando código Java que, ao lidar com análise acústica, por exemplo, nos permitiu usar malhas diferentes para frequências diferentes a fim de encontrar o equilíbrio correto entre a precisão da simulação e o tempo computacional. Ela também permitiu exportar automaticamente as saídas desejadas, tais como gráficos de SPL superficial e dados de SPL em campo distante durante a execução da simulação. Isso ajudou a economizar bastante tempo em relação ao pós-processamento manual e exportação dos dados."

Mohite também achou o Application Builder do COMSOL extremamente útil. "Criamos um aplicativo de simulação (Figura 6) usando o Application Builder, para comparar os arquivos de resultados da análise e traçar o gráfico dos dados de SPL, o que

economizou bastante tempo."

Os resultados das simulações demonstraram forte correlação com os dados dos experimentos físicos. Usando simulação, os engenheiros da Mahindra foram capazes de determinar ações corretivas por meio de modificações estruturais, com base nos resultados da análise nos estágios iniciais do projeto. Isso ajudou a reduzir tanto o tempo como os custos envolvidos no desenvolvimento do produto. "Quando apoiadas por experimentos, estas simulações nos guiaram na direção correta para encontrar uma solução eficiente para os problemas de ruído de nossas motocicletas", concluiu Bhatia. ❖

REFERÊNCIAS

1. Mohite, U., Bhatia, N., and Bhavsar, P., "An Approach for Prediction of Motorcycle Engine Noise under Combustion Load," *SAE Technical Paper 2015-01-2244*, 2015, doi:10.4271/2015-01-2244.
2. Reducing Motorcycle Engine Noise with Acoustics Modeling, *COMSOL Blog*, <https://www.comsol.com/blogs/reducing-motorcycle-engine-noise-with-acoustics-modeling/>

“Criamos um app de simulação usando o Application Builder, para comparar os arquivos resultantes da análise e plotar os dados de SPL, o que nos economizou muito tempo.

— ULHAS MOHITE, GERENTE DE P&D DA MAHINDRA

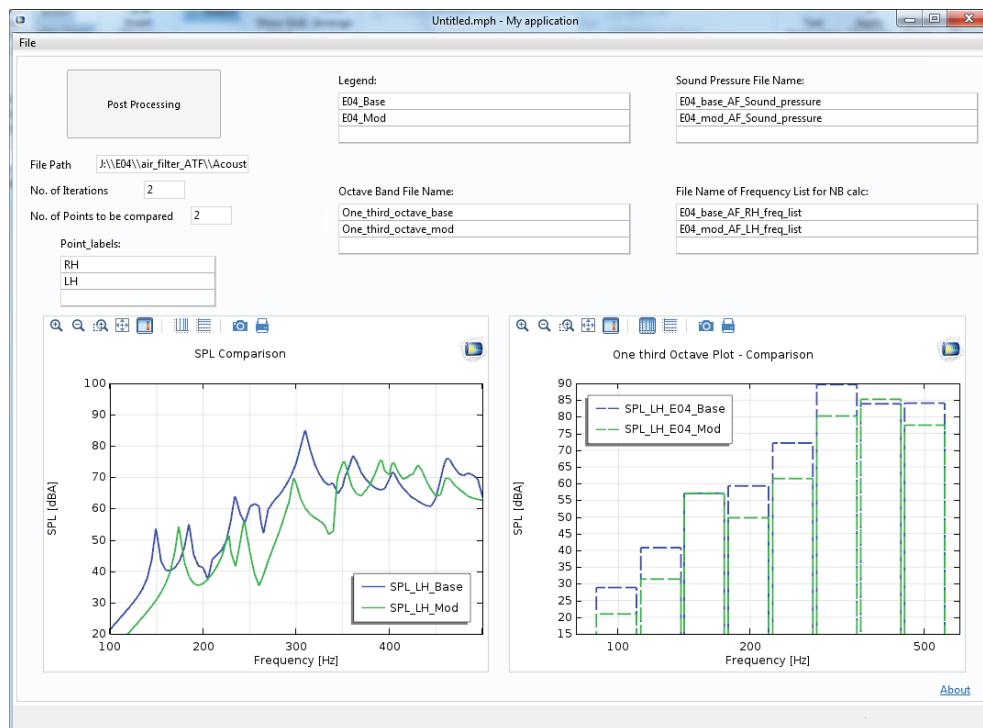


FIGURA 6. Com o Application Builder, os engenheiros da Mahindra criaram um aplicativo de simulação fácil de usar para comparar os arquivos de resultados e criar gráficos com os dados de nível de pressão sonora (SPL).



DAS PLANILHAS ÀS APLICAÇÕES MULTIFÍSICAS, A ABB CONTINUA A ENERGIZAR O SETOR DE TRANSFORMADORES

As empresas que desenvolvem equipamentos para transformadores de potência novos e aperfeiçoados incorrem em custos de prototipagem e testes, pois trabalham para reduzir o ruído dos transformadores. Na ABB, uma equipe de engenheiros desenvolve simulações multifísicas e aplicativos personalizados, para oferecer informações sobre seus projetos.

por **LEXI CARVER**

Para tudo que fazemos, desde cozinhar até recarregar nossos telefones, contamos a cada dia com a rede elétrica que energiza os edifícios, tais como casas, empresas e escolas. Essa complexa rede inclui estações geradoras de energia elétrica, linhas de transmissão de alta tensão, que transportam energia elétrica por grandes distâncias, linhas de distribuição, que fornecem energia a casas e bairros individuais, e os equipamentos relacionados, utilizados no controle e

proteção do fluxo de energia.

Entre estes equipamentos estão os transformadores, para aumentar e reduzir os níveis de tensão nas linhas de energia que transportam corrente alternada (veja a Figura 1). A transferência de potência com tensões mais elevadas resulta em perdas menores e, por isso, é mais desejável para a transmissão de energia por longas distâncias. No entanto, como esses níveis de alta tensão podem representar um risco de segurança em cada extremidade das linhas, utilizam-se transformadores para aumentar

os níveis de tensão no ponto de alimentação de energia e diminuí-los nas proximidades de bairros e edifícios.

Mas os transformadores sempre têm algum ruído, que frequentemente se manifesta como um zunido fraco ou um zumbido que se pode ouvir ao passar próximo a um deles. Embora seja impossível silenciá-los completamente, a regulamentação exige conformidade com os níveis de som seguros e um bom projeto de produto pode minimizar esses efeitos acústicos.



FIGURA 1. Foto de um transformador para linhas de alta tensão.

A ABB, um dos maiores fabricantes de transformadores utilizados em todo o mundo (com sede em Zurique, Suíça), usou análises numéricas e aplicações computacionais para prever e minimizar os níveis de ruído em seus transformadores. Através do software de simulação COMSOL Multiphysics® e seu Application Builder, a empresa faz verificações virtuais do projeto, testa diferentes configurações e disponibiliza os resultados das simulações através de interfaces de usuário personalizadas, construídas com base em seus modelos.

⇒ **SILENCIANDO O SOM DE VÁRIAS FONTES**

Em geral, o ruído de transformadores provém de várias fontes, tais como vibrações no núcleo do transformador ou das ventoinhas e bombas auxiliares usadas no sistema de resfriamento. Cada uma dessas fontes deve ser tratada de forma diferente, de modo a reduzir o ruído.

Os transformadores da ABB são compostos por um núcleo de metal com bobinas de fio enrolado em torno de diferentes seções, um

compartimento ou tanque para proteger esses componentes e um óleo isolante no interior desse tanque (veja a Figura 2, parte superior). A passagem de corrente alternada pelos enrolamentos de uma bobina gera um fluxo magnético, que induz corrente em uma bobina adjacente. O ajuste da tensão é obtido através de diferentes números de voltas da bobina.

Como o núcleo é feito de aço, um material magnetostritivo, esses fluxos magnéticos — que alternam de sentido continuamente — causam tensões mecânicas. Por sua vez, isto gera vibrações devido à rápida expansão e contração do metal. Tais vibrações chegam até as paredes do tanque, através do óleo e dos pontos de fixação que mantêm o núcleo interno em seu lugar, gerando um zumbido audível conhecido como ruído de núcleo (veja a Figura 2, parte inferior).

Além do ruído de núcleo, a corrente alternada presente na bobina produz forças de Lorentz nos enrolamentos individuais, gerando vibrações conhecidas como ruído de carga, que elevam a energia mecânica transferida ao tanque.

Com essas múltiplas fontes de ruído e

os fatores eletromagnéticos, acústicos e mecânicos interconectados, os engenheiros da ABB Corporate Center Research (ABB CRC) em Västerås, Suécia, precisavam entender o funcionamento interno de seus transformadores, a fim de otimizar seus projetos, para que os transformadores gerassem um zumbido mínimo.

⇒ **EFEITOS ACÚSTICOS, MECÂNICOS E ELETROMAGNÉTICOS REUNIDOS**

"Optamos por trabalhar com o COMSOL Multiphysics porque ele nos permite acoplar facilmente uma série de físicas diferentes", explicou Mustafa Kavasoglu, cientista da ABB CRC. "Como esse projeto exigiu a modelagem de eletromagnetismo, acústica e mecânica, o software COMSOL® foi a melhor opção para abordar essas três físicas em um só ambiente."

Mustafa Kavasoglu, o Dr. Anders Daneryd, cientista responsável, e o Dr. Romain Haettel, engenheiro responsável, formam a equipe da ABB CRC que trabalha com acústica de transformadores. Eles tinham o

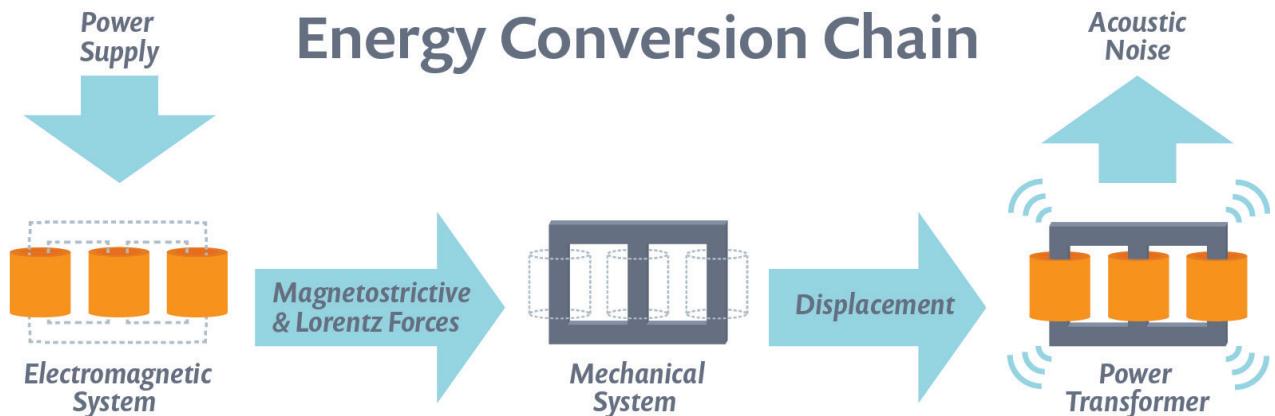
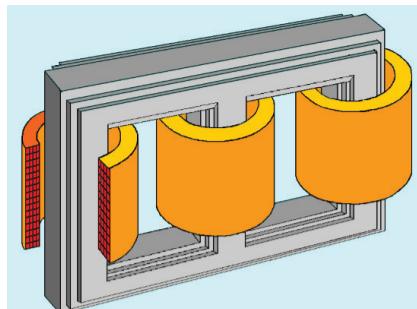


FIGURA 2. Lado superior esquerdo: Modelo em CAD da parte ativa de um transformador trifásico, com enrolamentos montados ao redor do núcleo. Lado superior direito: Parte ativa de um transformador, imersa em um tanque cheio de óleo. Parte inferior: Cadeia de conversão de energia referente ao ruído do núcleo e geração do ruído de carga (magnetostrrição no núcleo e forças de Lorentz nos enrolamentos).

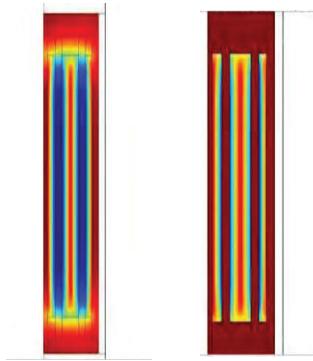


FIGURA 3. Resultados de simulação mostrando a densidade do fluxo magnético (esquerda) e as forças de Lorentz (direita) nos enrolamentos da bobina do transformador.

objetivo de criar uma série de simulações e aplicativos computacionais para calcular o fluxo magnético gerado no núcleo e nos enrolamentos dos transformadores (veja a Figura 3, esquerda), as forças de Lorentz nos enrolamentos (veja a Figura 3, direita), os deslocamentos mecânicos provocados pelas tensões magnetostritivas e os níveis de pressão resultantes das ondas acústicas que se propagam pelo tanque.

Eles trabalham em estreita colaboração com a unidade de negócios da ABB Transformers, muitas vezes recorrendo à experiência e ao conhecimento do Dr. Christoph Ploetner, um profissional reconhecido na área de transformadores de potência, para garantir que eles satisfaçam as necessidades e exigências do negócio.

Uma das simulações modela o ruído gerado pelo núcleo devido à magnetostricção. A equipe começou com um modelo eletromagnético para prever os campos magnéticos induzidos pela corrente alternada e, em seguida, as tensões magnetostritivas no aço.

A configuração de geometria concebida por eles incluía o núcleo de aço, os enrolamentos e um domínio exterior representando o tanque. "Obtivemos o deslocamento a partir das deformações magnetostritivas e calculamos, então, a

“Estamos também usando a licença do COMSOL Server™ para enviar nosso app a outros escritórios para fins de teste, o que torna mais fácil compartilhar esse programa. Essa licença mundial é excelente; com uma organização global, esperamos que usuários de nossas outras unidades ao redor do mundo possam se beneficiar de tais aplicativos.”

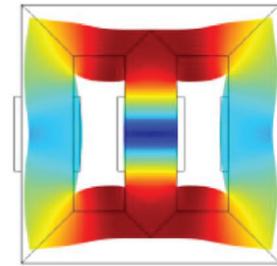
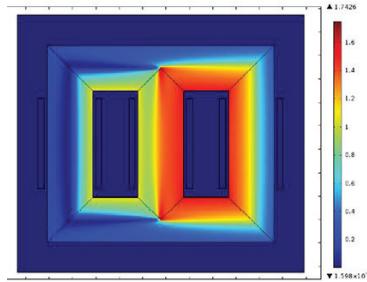


FIGURA 4. Esquerda: Resultados do software COMSOL® mostrando os níveis do fluxo magnético no aço. Direita: Resultados mostrando a ressonância do núcleo. As deformações foram exageradas para fins de visualização.

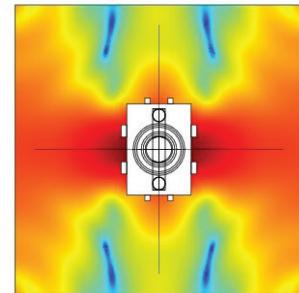
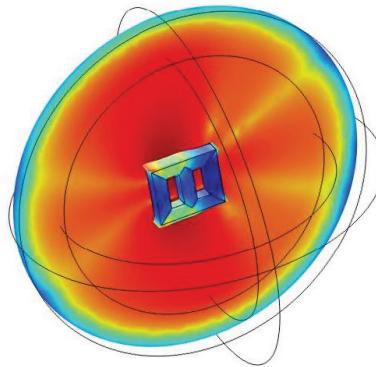


FIGURA 5. Resultados da análise acústica mostrando o campo de pressão sonora ao redor do núcleo (esquerda) e ao redor do transformador (direita).

ressonância para diferentes frequências, utilizando uma análise modal", disse Kavasoglu (veja a Figura 4). "As ressonâncias são facilmente excitadas pelas tensões magnetostritivas e causam grande amplificação da vibração nessas frequências."

Eles foram então capazes de prever as ondas sonoras que se deslocam pelo óleo e de calcular as vibrações resultantes do tanque, implicando em irradiação do som para o ambiente ao redor (veja a Figura 5).

Eles simularam, também, os deslocamentos dos enrolamentos da bobina que geram ruído de carga e determinaram a pressão superficial nas paredes do tanque, causada pelo campo sonoro resultante (veja a Figura 6).

A inclusão de estudos paramétricos que

ilustram as complexas relações entre os parâmetros de projeto (tais como espessura do tanque e propriedades dos materiais) e o zumbido resultante do transformador permitiu ajustar a geometria e a configuração do núcleo, dos enrolamentos e do tanque, a fim de minimizar o ruído.

⇒ DIVULGANDO RECURSOS DE SIMULAÇÃO POR TODA A ABB

A equipe da CRC continua a utilizar o software COMSOL, não só para refinar sua compreensão e seus modelos, mas, também, para estender seus conhecimentos aos demais projetistas da ABB e à unidade de negócios. Usando o Application Builder do COMSOL Multiphysics, eles passaram a criar apps a partir de seus modelos multifísicos, que podem ser facilmente personalizados de acordo com as necessidades de cada departamento.

Esses aplicativos de simulação simplificam o teste e a verificação para projetistas e engenheiros de P&D: "Os projetistas têm utilizado ferramentas baseadas em estatísticas e modelos empíricos. Estamos

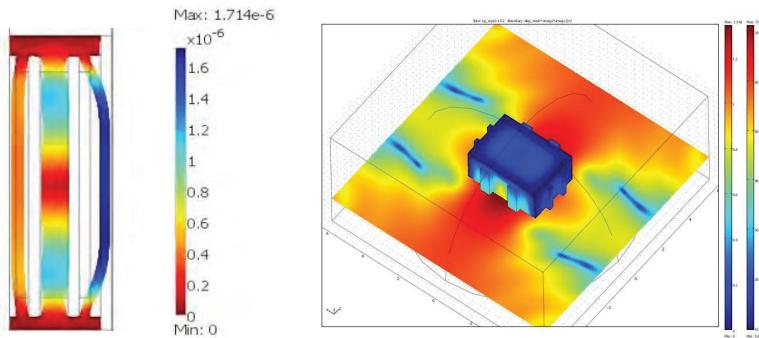


FIGURA 6. Esquerda: Resultados de simulação mostrando o deslocamento dos enrolamentos. As deformações foram exageradas para fins de visibilidade. Direita: Resultados mostrando os níveis de pressão sonora fora do tanque e o deslocamento das paredes

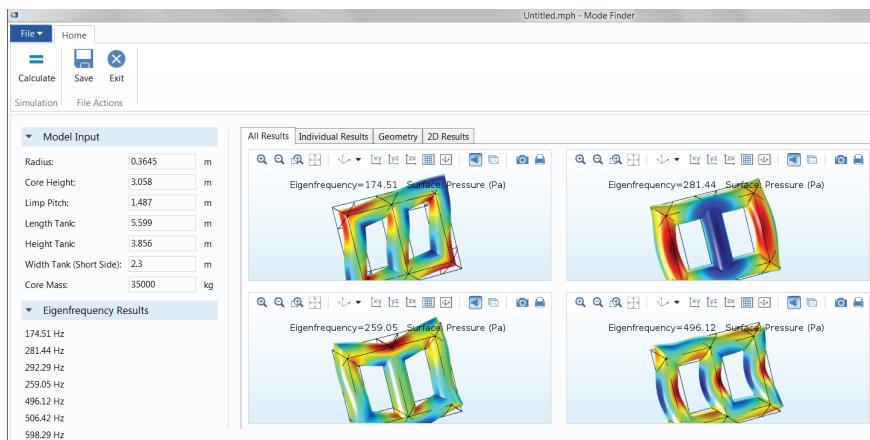


FIGURA 7. Imagem parcial obtida do primeiro app de simulação, criado para o cálculo de frequências naturais do núcleo do transformador. À esquerda, uma aba desse aplicativo mostra as entradas do modelo; à direita, vê-se os resultados para as frequências naturais calculadas. As deformações foram exageradas para fins de visibilidade.

preenchendo as lacunas mediante a implantação de apps de simulação. O Application Builder nos permitiu fazer com que eles tenham acesso à análise de elementos finitos, através de uma interface de usuário, sem a necessidade de aprender a teoria dos elementos finitos", explicou Haettel.

Um dos aplicativos (veja a Figura 7) permite calcular as frequências naturais específicas do núcleo do transformador que podem implicar em problemas de ruído, devido às frequências situadas na faixa audível. Esse aplicativo inclui tanto o modelo físico desenvolvido no software COMSOL® como os métodos personalizados escritos em código Java® e programados no Application Builder.

"Nossos projetistas utilizam planilhas padronizadas, que têm bom resultado para transformadores produzidos com frequência. Mas com novos projetos ou

dimensões diferentes, eles podem ter problemas com essa abordagem, tais como saídas incorretas, mostrando dados menos precisos para níveis de ruído. Isto pode se tornar muito dispendioso se for preciso adotar outras medidas para reduzir o ruído no transformador concluído", acrescentou Haettel.

"Além do aspecto de custo, há também o aspecto de prazo. O novo aplicativo irá tornar o trabalho dos projetistas mais fácil e eficiente, usando-se a precisão de um código FEA."

O aplicativo personalizado eleva o nível de conveniência, permitindo que os usuários verifiquem como certas combinações de geometria, propriedades do material e outros parâmetros de projeto afetarão o zumbido resultante do transformador. "Temos sido cautelosos na seleção dos parâmetros aos quais daremos acesso — com foco nos mais importantes",

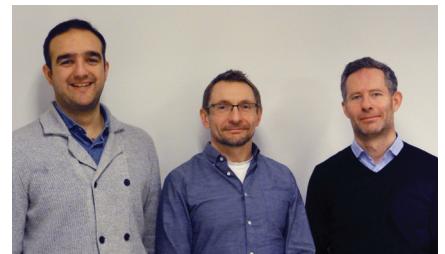
acrescentou Kavasoglu.

Com a ampla gama de aplicações industriais que requerem o projeto de transformadores da ABB, essa flexibilidade é extremamente útil para suas atividades de projeto e testes virtuais. "A ABB produz transformadores para cada necessidade industrial. Atualmente, estamos nos concentrando em grandes transformadores de CA, comumente usados por empresas energéticas que transmitem e distribuem energia elétrica para as cidades", explicou.

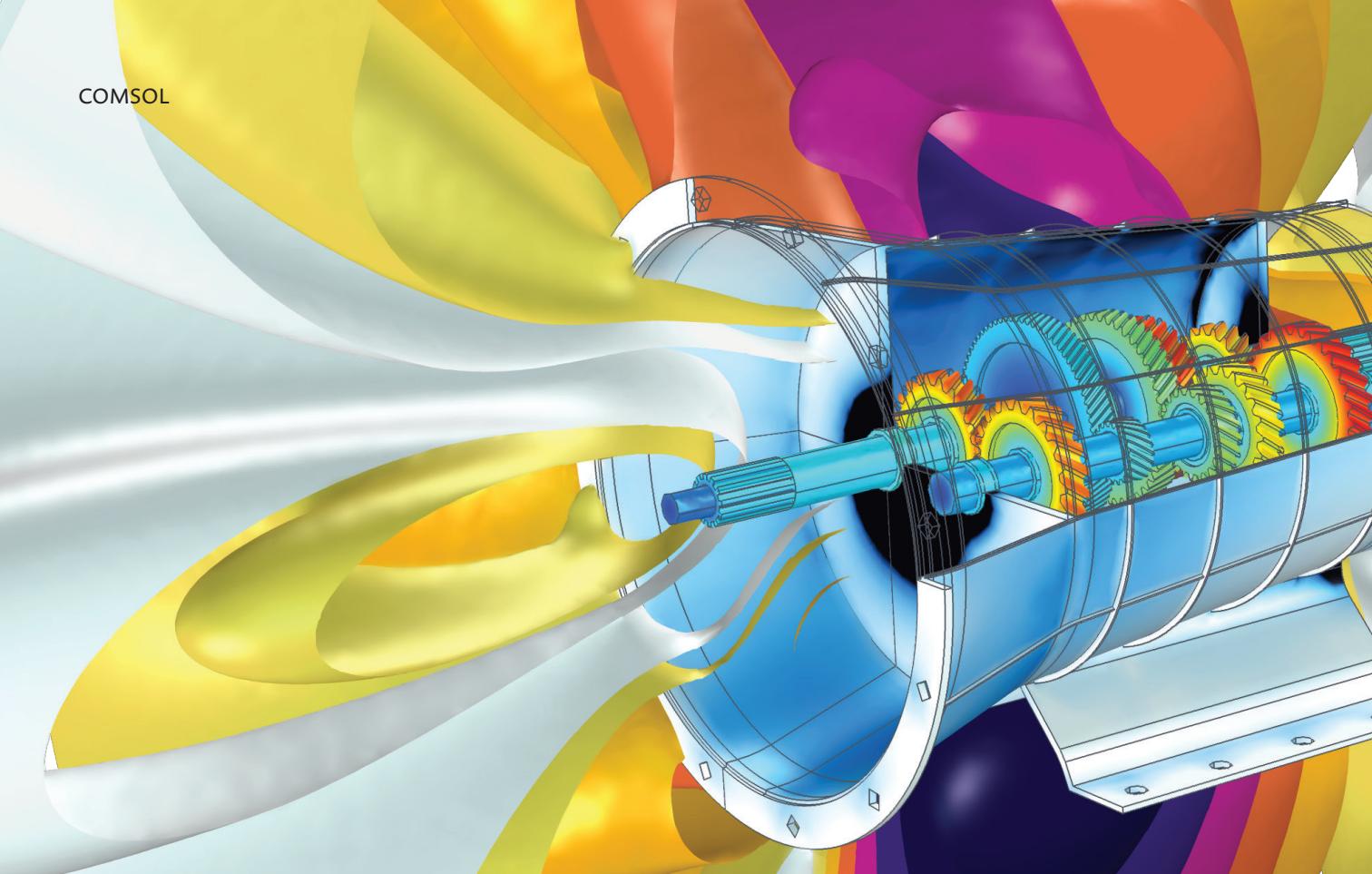
"Mas o trabalho que estamos realizando pode ser adaptado a qualquer tipo de transformador, e é claro que se recebermos um pedido específico, modificaremos o aplicativo a essa necessidade. Isto nos permite realizar facilmente um trabalho adicional de desenvolvimento. O Application Builder facilitou bastante a transferência de conhecimento e tecnologia."

"Estamos usando também a licença do COMSOL Server™ para enviar nosso app a outros escritórios para fins de teste, o que torna mais fácil compartilhar esse software. Essa licença global é excelente; com uma organização global, esperamos que usuários de nossas outras unidades ao redor do mundo possam se beneficiar de tais aplicativos." Com uma instalação local do COMSOL Server, os especialistas em simulação podem gerenciar e distribuir seus próprios apps, tornando-os acessíveis através do COMSOL Client ou um navegador de Internet.

A equipe está se concentrando, agora, em um segundo aplicativo, que irá calcular o ruído de carga. Uma vez implementado na unidade de negócios, esse app irá reduzir ainda mais o esforço de cálculos tediosos, permitindo que projetistas e engenheiros de vendas executem mais testes virtuais, sem a necessidade de trabalhar com um modelo detalhado, além de permitir que a ABB produza os melhores transformadores do mundo, de modo mais rápido e fácil. ❖



Da esquerda para a direita: Mustafa Kavasoglu, Romain Haettel e Anders Daneryd da ABB CRC.



MODELAGEM DE VIBRAÇÃO E RUÍDO EM UMA CAIXA DE CÂMBIO

Prever a irradiação de ruído por um sistema dinâmico, como uma caixa de câmbio, oferece uma boa compreensão do sistema aos projetistas logo no início das atividades de projeto.

por **PAWAN SOAMI**

A caixa de câmbio, usada para transferir energia do motor às rodas, irradia ruído por duas razões. Em primeiro lugar, as engrenagens — que transmitem energia de um eixo para outro — exercem forças laterais e axiais indesejáveis sobre os rolamentos e a carcaça. Em segundo lugar, a flexibilidade dos diferentes componentes da caixa de câmbio, incluindo os rolamentos e a carcaça, pode resultar em vibração.

Em uma caixa de câmbio, a rigidez do engrenamento causa uma vibração sustentada, que é transmitida à sua carcaça — que, por sua vez, vibra e transmite energia ao fluido circundante (óleo de câmbio, por exemplo), resultando em uma irradiação de ondas acústicas.

Para modelar e simular com precisão esses fenômenos acoplados, deve-se efetuar análises de contato, dinâmica multicorpo e acústica.

A caixa de câmbio considerada nesta análise possui um eixo de transmissão conectado ao contraeixo e cinco pares de engrenagens helicoidais (Figura 1). As engrenagens têm diferentes dimensões, mas são feitas do mesmo material: aço estrutural.

⇒ ANÁLISE DE CONTATO DO JOGO DE ENGRENAGENS

O engrenamento, que é assumido como elástico, é fonte de vibração sustentada. Dessa forma, deve-se avaliar a rigidez das engrenagens em diferentes posições.

Como os dentes de engrenagens deformam-se durante a operação, efetua-se uma análise paramétrica estática para determinar a variação de rigidez ao longo de um ciclo de engrenamento. Utiliza-se um método de contato de penalidade, com a definição de restrições para prever a torção das engrenagens, que geram as forças de contato.

Os resultados da simulação, que mostram a distribuição das tensões de von Mises em um par de engrenagens, indicam também altos valores de tensão nos pontos de contato, assim como na base dos dentes (Figura 2). Com o uso de simulação, é possível ver a variação da rigidez de engrenamento com a rotação do eixo, como mostra a Figura 2.

⇒ ANÁLISE MULTICORPO DE EIXOS, ENGRENAGENS E CARÇAÇA

A análise de multicorpos é efetuada no domínio do tempo, para uma volta completa do eixo de transmissão, empregando-se a rigidez de engrenamento prevista pela análise de contato. Essa análise é necessária para se computar a dinâmica das engrenagens e as vibrações resultantes da carcaça. Neste caso, a análise é efetuada

com uma rotação de 5000 rpm do motor e um torque de saída de 2000 N*m. Assume-se que eixos e engrenagens sejam rígidos, exceto pelo engrenamento, para o qual se utiliza a rigidez obtida na análise de contato anterior. A carcaça é de aço, sendo então considerada elástica.

A Figura 3 exhibe a distribuição das tensões de von Mises na carcaça, devido às forças transmitidas pelo eixo de transmissão e pelo contraeixo. A aceleração na direção normal da carcaça, que é responsável pela irradiação de ruído, também aparece na Figura 3.

A Figura 4, por sua vez, mostra o histórico no tempo e na frequência da aceleração normal no topo da carcaça. As frequências dominantes de vibração da carcaça situam-se entre 1500 e 2000 Hz. A deformação da carcaça pode ser vista na Figura 5.

⇒ ANÁLISE ACÚSTICA DO RUÍDO IRRADIADO PELA CARCAÇA

Na análise acústica, utiliza-se a aceleração normal sofrida pela carcaça e prevista pela análise multicorpo como fonte de ruído. A simulação, realizada no domínio da frequência, prevê o nível de pressão sonora externa à caixa de câmbio. Como os valores da aceleração normal estão no domínio do tempo, utiliza-se uma transformada rápida de Fourier direta (forward FFT) para convertê-los ao domínio da frequência. Um domínio de ar envolve a caixa de câmbio onde a pressão acústica é calculada (Figura 6). Para reduzir o tamanho do domínio computacional

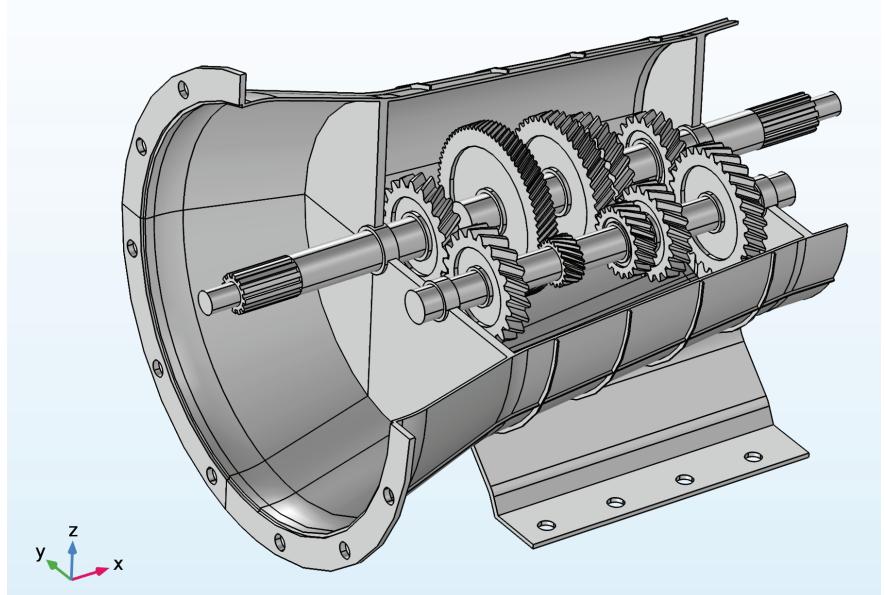


FIGURA 1. Geometria do modelo de uma caixa de câmbio sincronizada de 5 marchas, para veículos de transmissão manual. Aparecem aqui somente partes seleccionadas, que foram consideradas na análise multicorpo.

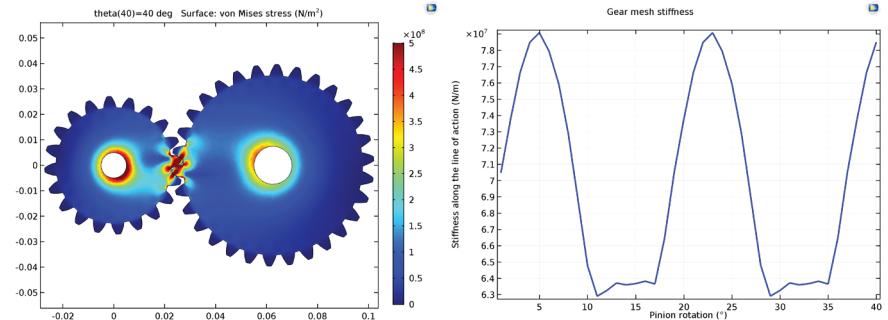


FIGURA 2. Esquerda: Distribuição das tensões de von Mises em um par de engrenagens. Direita: Variação da rigidez de engrenamento com a rotação do eixo.

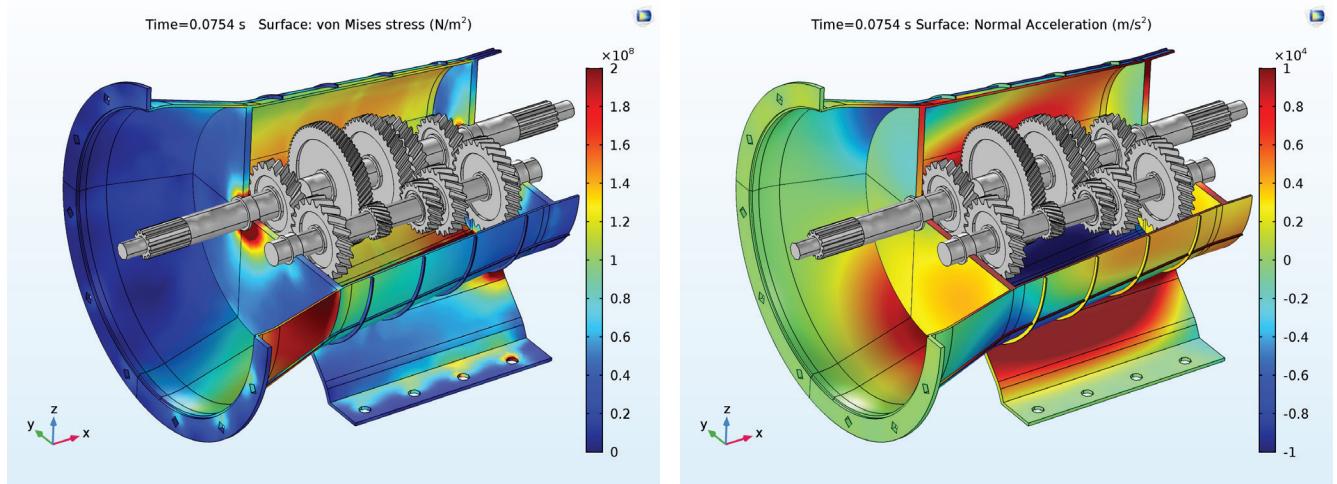


FIGURA 3. Esquerda: Distribuição das tensões de von Mises na caixa. Direita: Aceleração normal da carcaça.

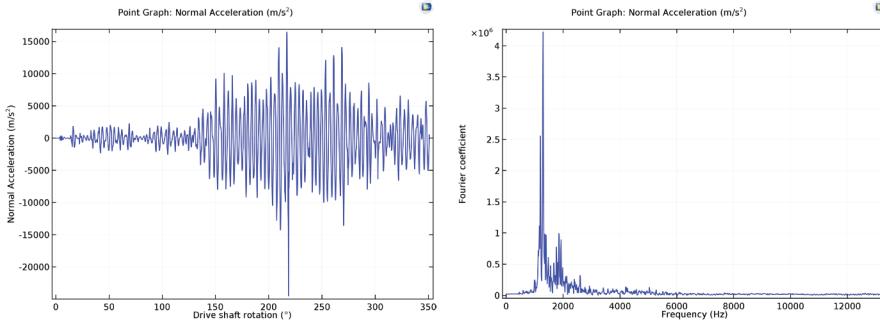


FIGURA 4. Aceleração normal no topo da. Esquerda: Histórico de tempo. Direita: Espectro caixa de frequências.

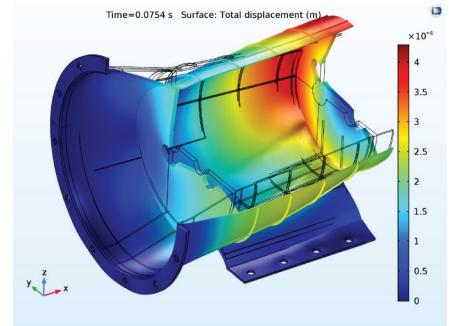


FIGURA 5. Deformação da carcaça ampliada 200 vezes.

sem afetar a precisão dos resultados, aplica-se uma condição de irradiação de ondas esféricas aos limites externos do domínio de ar, a fim de permitir que as ondas acústicas de saída deixem o domínio de modelagem com reflexões mínimas.

O nível de pressão sonora (SPL) na superfície da carcaça e no campo próximo aparecem na Figura 7. Pode-se, também, plotar o SPL no campo distante, como se vê na Figura 8. Plotagens de campo distante em diferentes planos, à distância de 1 metro, dão uma ideia das direções dominantes da irradiação de ruído na frequência selecionada.

⇒ **COMENTÁRIOS FINAIS**

Para simular vibrações e ruídos gerados, adota-se uma abordagem para modelagem de interação multicorpo-acústica. É possível empregar essa técnica já no início do processo de projeto de uma caixa de câmbio, aperfeiçoando assim o projeto de tal modo, a ponto de minimizar a irradiação de ruído em diferentes condições operacionais. ❖

RECURSOS

- Utilizando software para previsão de ruído em caixas de câmbio, Auto Tech Review, junho de 2017
- Como modelar vibração e ruído de caixas de câmbio com a solução COMSOL Multiphysics®, Blog da COMSOL
- Modelagem de vibração e ruído em uma caixa de câmbio, Galeria de Aplicativos da COMSOL

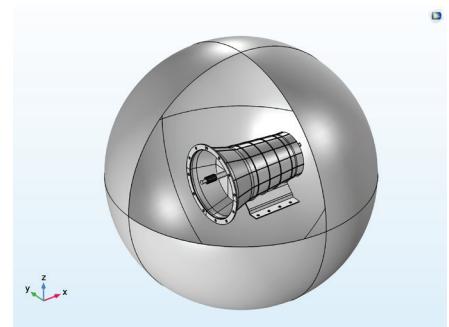


FIGURA 6. Domínio de ar envolvendo a caixa de câmbio utilizada na análise acústica.

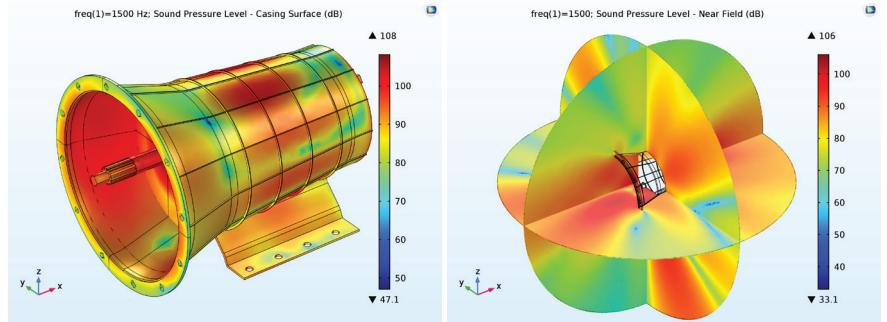


FIGURA 7. Nível de pressão sonora a 1500 Hz. Esquerda: Superfície da caixa. Direita: Região de campo próximo.

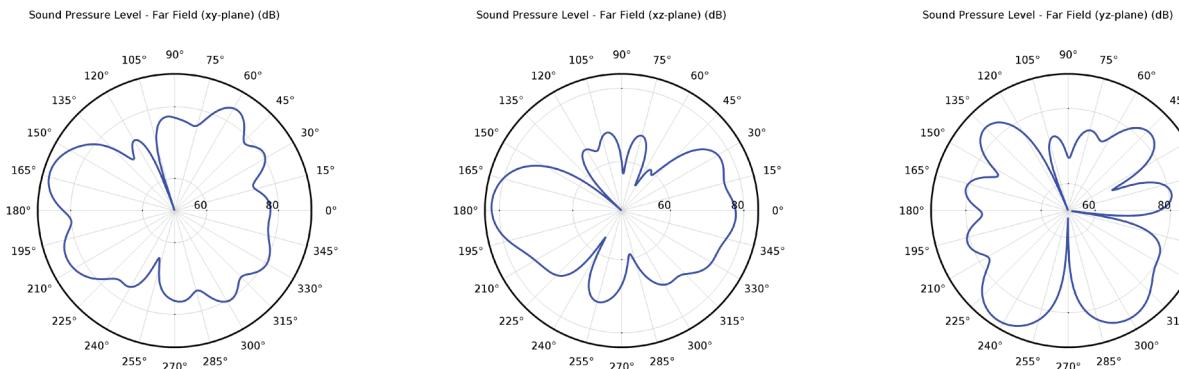


FIGURA 8. SPL de campo distante (em dB) nos planos x-y, x-z e y-z respectivamente, à distância de 1 metro, em 1500 Hz.

Manipulação e Controle do Som: Como a Modelagem Matemática dá Suporte à Pesquisa de Metamateriais Acústicos de Ponta

Do áudio de consumo à formação de imagens por ultrassom, as implicações da pesquisa de estruturas de metamateriais para camuflagem acústica são fascinantes e de longo alcance. Os pesquisadores estão utilizando modelagem matemática para projetar metamateriais acústicos, pela combinação de acústica de transformação com estruturas altamente anisotrópicas.

por **GEMMA CHURCH AND VALERIO MARRA**

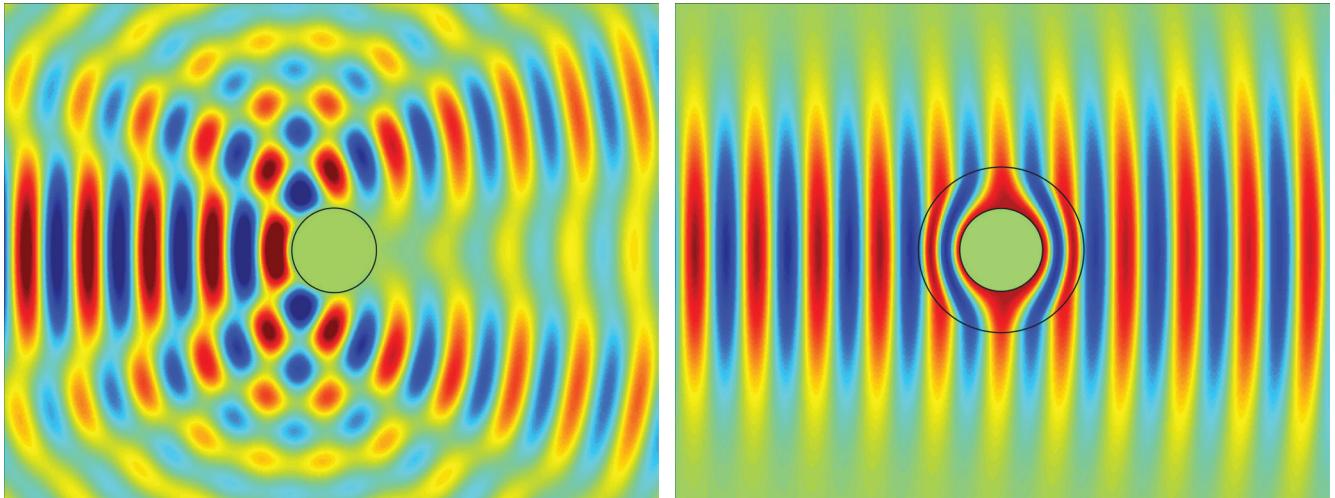


FIGURA 1. Controlando a dispersão de ondas acústicas a partir de um objeto. Esquerda: É óbvia a dispersão de uma onda incidente a partir da esquerda de um objeto rígido: a reflexão é quase especular, a sombra é profunda e uma parte da energia dessa onda se dispersa em todas as direções. Direita: Ao circundar o mesmo objeto com um escudo de camuflagem ideal, vê-se a ausência tanto de reflexão como de sombra e a energia é transmitida ao redor do objeto de metamaterial virtualmente quase sem perdas.

Metamateriais são materiais feitos pelo homem, especialmente fabricados, apresentando propriedades nunca encontradas na natureza, tal como índice de refração nulo ou até negativo. O resultado é a criação de propriedades e dispositivos inovadores, tais como superlentes e absorvedores de som. Recentes esforços de pesquisa permitiram a manipulação arbitrária de ondas sonoras utilizando dispositivos com metamateriais, até o ponto de tornar um objeto acusticamente invisível.

A pesquisa tem sido um sucesso. Usando pouco mais que algumas placas perfuradas de plástico e um volume impressionante de trabalho com modelagem matemática e simulação numérica, os engenheiros da Universidade Duke demonstraram o primeiro dispositivo de camuflagem 3D do mundo. Esse dispositivo permite curvar suavemente as ondas sonoras ao redor de um objeto e preencher as sombras, dando

a impressão de que as ondas passam direto pelo ar circundante.

Invisibilidade acústica é apenas um aspecto do amplo conceito da acústica de transformação, pela qual materiais cuidadosamente projetados podem deformar ou controlar as ondas sonoras em modos quase arbitrários. Da ficção científica ao uso comum, há inúmeras aplicações possíveis para esse avanço tecnológico.

⇒ PROJETANDO METAMATERIAIS SILENCIOSOS

A Universidade Duke, juntamente com o MIT, a Universidade da Califórnia (em Berkeley), a Universidade Rutgers e a Universidade do Texas (em Austin), faz parte de um programa de pesquisa de 5 anos, patrocinado pelo US Office of Naval Research, para o desenvolvimento de novos conceitos de metamateriais acústicos com parâmetros de materiais

eficazes, que possam ser produzidos no mundo real. Steve Cummer, professor de engenharia elétrica e computacional da Universidade Duke, afirmou: "Modelos matemáticos representam o ponto de partida. Os projetos de metamateriais acústicos são otimizados através de simulações numéricas, que convertemos, então, em técnicas modernas de produção

“O software COMSOL torna muito fácil e relativamente simples a manipulação de propriedades dos materiais e as equações dinâmicas subjacentes.”

— STEVE CUMMER, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTACIONAL, UNIVERSIDADE DUKE

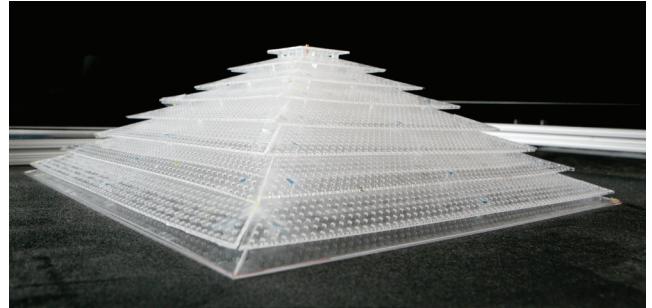
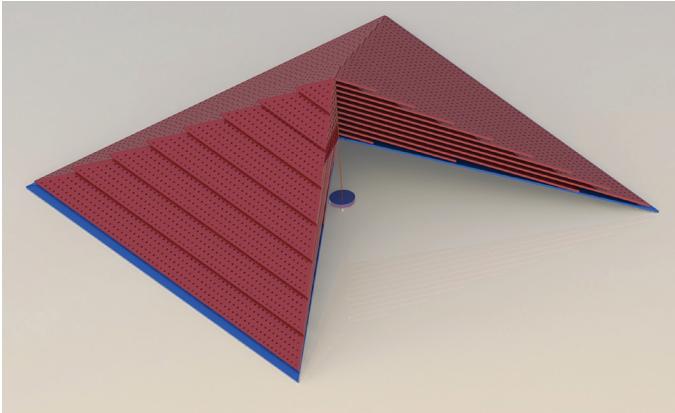


FIGURA 2. Projeto (esquerda) e versão construída (direita) do escudo de camuflagem acústica em 3D com forma piramidal.

e testamos experimentalmente."

Um dos focos dos atuais esforços de pesquisa do grupo dirige-se para o desenvolvimento de estruturas de metamateriais que possam ser utilizadas em ambientes à base de água, incluindo o corpo humano, para transformar e controlar arbitrariamente as ondas sonoras recebidas. Estruturas de camuflagem acústica (Figura 1) provaram ser uma útil base de testes para demonstrar o controle arbitrário permitido pela acústica de transformação. O projeto para ambientes aquosos constitui uma mudança na pesquisa de metamateriais, que evoluiu da camuflagem eletromagnética e da óptica de transformação para a camuflagem acústica e transformações em 2D e depois estruturas 3D no ar.

O software COMSOL Multiphysics® tem sido um item vital em cada etapa da pesquisa, desde os primeiros tempos da camuflagem eletromagnética. Segundo Cummer, "No primeiro relatório técnico, no qual mostramos simulações de camuflagem eletromagnética utilizando parâmetros reais de materiais eletromagnéticos, empregamos o software COMSOL® especificamente porque era uma das únicas ferramentas de software para eletromagnetismo com capacidade de acomodar parâmetros de materiais eletromagnéticos arbitrariamente anisotrópicos."

Para lidar com o problema de acústica, os pesquisadores começaram por derivar as propriedades necessárias dos materiais. Como explicou Cummer, "Para controlar o som arbitrariamente usando acústica de transformação, aplicamos primeiro uma transformação de coordenadas, para descrever como queremos curvar, torcer ou deformar o campo sonoro em um certo dispositivo. Uma vez definida essa transformação de coordenadas, podemos, então, derivar os parâmetros

efetivos requeridos do material, para criar a deformação do campo sonoro."

A série resultante de parâmetros é quase sempre anisotrópica, ou seja, as propriedades do material comportam-se de maneira diferente em direções diferentes. Para abordar essa questão, os pesquisadores deveriam ter condições de alterar as equações que representavam a física sob simulação. "O software COMSOL torna muito fácil e relativamente simples a manipulação de propriedades dos materiais e as equações dinâmicas subjacentes. Isto foi realmente importante, porque pudemos dar aquele toque adicional à anisotropia do modelo, para começar, então, a simular alguns dos projetos que estávamos explorando com a abordagem da acústica de transformação", acrescentou Cummer.

Os projetos reais resultantes foram bem-sucedidos e seu desempenho coincidiu "excepcionalmente bem" com

as simulações, segundo Cummer. "O padrão máximo em publicações sobre metamateriais atualmente, para demonstrar que uma estrutura atua como desejado e produz a física requerida, exige medições do campo sonoro completo gerado pelo metamaterial acústico e comparações com a simulação", acrescentou ele.

O software COMSOL Multiphysics® é capaz de obter essa coincidência de modo consistente, mesmo com a ocorrência de erros humanos que poderiam ter arruinado a pesquisa. Em um projeto anterior, um escudo de camuflagem acústica em 2D, contendo uma série de pequeno furos, foi projetado e construído, mas os experimentos não corresponderam às simulações. A equipe ficou desconcertada, incapaz de perceber uma razão viável para essa discrepância. Em seguida, percebeu que os furos da estrutura possuíam um tamanho incorreto, devido a uma confusão durante a

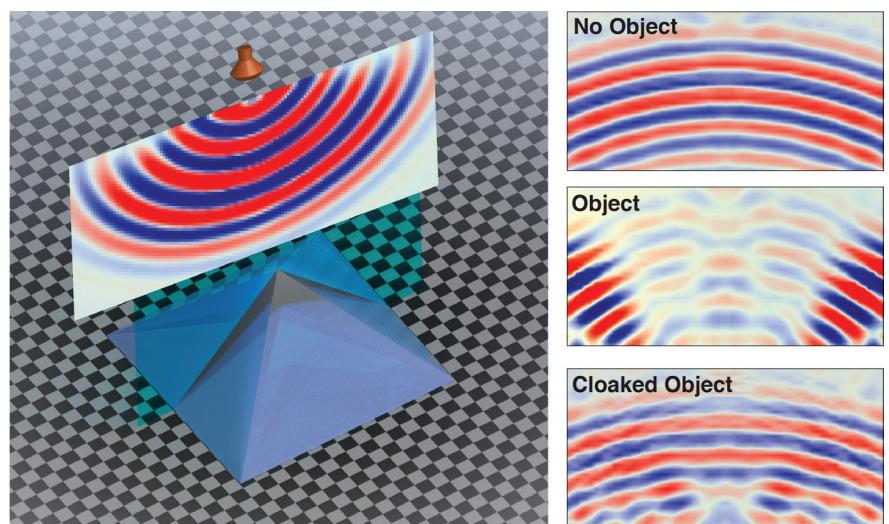


FIGURA 3. Esquerda: Para testar o escudo do metamaterial, aplica-se um pulso de som em três configurações diferentes e mede-se, então, o pulso refletido com um microscópio de varredura. Direita: O pulso acústico refletido pelo objeto de teste é radicalmente diferente daquele observado sem objeto. Ao se aplicar o escudo de camuflagem sobre o objeto, o pulso refletido torna-se quase idêntico ao observado sem objeto algum, demonstrando sua invisibilidade ao som.

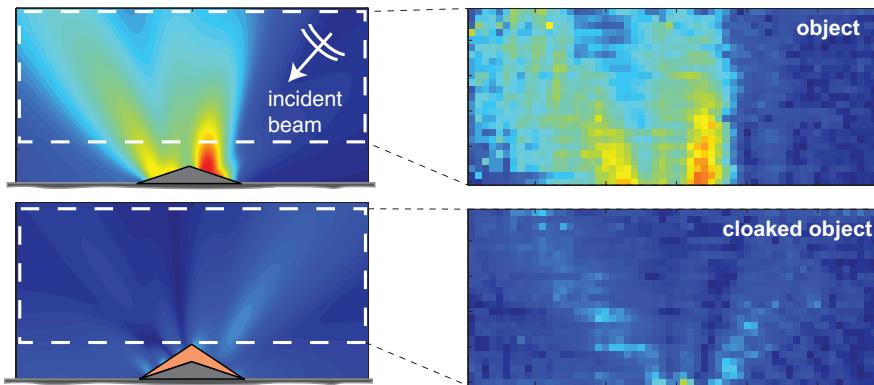


FIGURA 4. A coincidência adequada entre simulações (esquerda) e medições (direita) dos campos acústicos dispersos não só demonstra o grau de camuflagem acústica do objeto, mas também confirma que o software COMSOL pode prever, com precisão, o desempenho do dispositivo fabricado.

fase de construção.

Segundo Cummer, "A eficiência do software COMSOL foi bastante crucial em nosso trabalho, pois pudemos fazer simulações numéricas tanto dos parâmetros idealizados como da estrutura completa que iríamos construir, para comprovar que se comportavam da mesma forma."

⇒ FABRICANDO E TESTANDO UM METAMATERIAL ACÚSTICO

O projeto de um escudo de camuflagem acústica em 3D utilizou a mesma estrutura básica de placas perfuradas e forma piramidal (Figura 2), sob a qual se pode ocultar um objeto das ondas sonoras. A estrutura pode parecer inicialmente simples em sua concepção, mas foi preciso balancear muitos fatores para obter a transformação acústica desejada, incluindo diâmetro dos furos, espaçamento entre placas e ângulo dessas placas. Todos esses parâmetros foram combinados para fornecer o nível correto de anisotropia acústica, para que a estrutura pudesse funcionar.

Essa estrutura piramidal tornou-se o primeiro escudo de camuflagem acústica em 3D do mundo; medições de laboratório comprovaram que ela é capaz de redirecionar as ondas acústicas, para criar a impressão de que tanto a camuflagem como qualquer coisa sob ela não estão presentes (Figura 3). O dispositivo atua nas três dimensões, sem importar a direção do som recebido ou a localização do observador; tem assim potencial para futuras aplicações, tal como invisibilidade a sonares e acústica arquitetônica.

Considerando a espessura necessária do

escudo de metamaterial acústico, a segunda opção é mais plausível, onde esses dispositivos de camuflagem acústica poderiam ser usados para otimizar o som em salas de concertos ou amortecê-lo em ambientes ruidosos de restaurantes, por exemplo. Segundo Cummer, "O material de camuflagem não é uma tinta mágica que pode recobrir as coisas. De modo geral, não é dessa forma que tais ideias podem ser implementadas na prática."

Além do estágio de projeto, modelagem e simulação vêm sendo utilizadas para prever o desempenho quantitativo de escudos de metamateriais como esse, incluindo uma análise detalhada da dispersão a partir da implementação de um escudo de camuflagem em 2D (Figura 4). Isto não mostra apenas quanto o campo disperso é reduzido pelo escudo; o software COMSOL prevê ainda, com precisão, os compromissos de um determinado projeto quanto ao nível de redução da dispersão, feitos durante a produção do metamaterial acústico.

⇒ DO AR PARA A ÁGUA: MEIOS DIFERENTES, NOVOS DESAFIOS

A atenção foi agora voltada a obter metamateriais acústicos que atuem em ambientes aquosos, tais como em locais subaquáticos ou no interior do corpo humano. Utilizou-se modelagem multifísica como principal ferramenta de projeto, para mapear primeiramente as estruturas projetadas anteriormente, para testar como elas iriam se comportar na água. A mudança do ar para a água é mais difícil do que parece.

O problema está no fato de que as propriedades mecânicas do ar são

drasticamente diferentes daquelas apresentadas pela água. Como explicou Cummer, "É por isso que no ar podemos construir metamateriais acústicos de plástico ou qualquer outro material sólido conveniente, pois ele pode atuar essencialmente como uma estrutura perfeitamente rígida para controlar o fluxo do campo sonoro. Realmente não importa do que ele é feito."

Mas a densidade e a rigidez compressiva da água não diferem muito das apresentadas por materiais sólidos. "Quando as ondas sonoras atingem uma estrutura sólida na água, as propriedades mecânicas dessa estrutura começam a ter grande importância. Precisamos conceber novas técnicas na fase de projeto, para termos condições de controlar como essa energia das ondas sonoras irá interagir com o sólido, para que possamos então manter as propriedades desejadas", acrescentou ele.

"A capacidade de mesclar acústica e mecânica estrutural é essencial, especialmente quando lidamos com estruturas na água, onde não podemos ignorar as respostas mecânicas do material sólido que utilizamos para construir o metamaterial. Na acústica do ar, resolvemos o problema tratando o sólido como um material infinitamente rígido, o que é fácil e eficiente em termos computacionais; mas para materiais na água, é vital ter condições de considerar a interação fluido-estrutura – o que é simples com o software COMSOL."

Transformar o resultado das pesquisas em estruturas de metamateriais acústicos comercialmente viáveis não é nada simples, pois exige a capacidade de fabricar essas estruturas de modo confiável e repetitivo. Cummer concluiu dizendo "O próximo passo na criação de qualquer metamaterial acústico envolve a capacidade de atender métricas quantitativas específicas. Isto significa que teremos uma etapa de projeto mais complexa, mas é exatamente para isso que foi projetado o software COMSOL. [Ele permite] um volume muito maior de iterações de projeto e um uso inteligente da otimização, para se identificar graus de liberdade no projeto que possam ser manipulados, para então se atingir aquelas metas numéricas específicas. Essa é definitivamente a chave para avançar e converter essas ideias, a partir das demonstrações de prova de conceito, em algo que seja realmente prático e implementável no mundo real. ❖

COMBATENDO AS VIBRAÇÕES INCÔMODAS

Pesquisadores noruegueses estão observando como as ondas sonoras de baixa frequência percorrem o interior de edifícios, de modo que possam recomendar ajustes de projeto que reduzam vibrações incômodas.

por **JENNIFER HAND**

Qualquer um que já tenha dormido nas proximidades de um aeroporto conhece a sensação de acordar com um voo logo de manhã cedo, não só pelo ruído do avião, mas, também, porque tudo ao redor parece estar tremendo. Da mesma forma, pessoas que moram próximas a turbinas eólicas, instalações militares ou hospitais equipados com heliportos costumam se queixar da agitação de janelas e do zumbido de objetos do cotidiano, gerados por ruído externo. O mais intrigante para essas pessoas é o fato de que, mesmo sem ouvir som algum, podem perceber vibrações irritantes.

Se a resposta sonora for de 20 vibrações por segundo (20 Hz) ou menos, é descrita como infrassom — ou seja, o som original não é normalmente audível pelo ouvido humano. Os efeitos, porém, são facilmente detectáveis. Quando as ondas atingem as janelas, espalham-se pelo piso e afetam as paredes internas, induzem uma vibração interna perceptível. Ondas sonoras de baixa frequência são notórias pelo seu potencial de gerar perturbações incômodas.

⇒ ONDAS SONORAS DE BAIXA FREQUÊNCIA EM EDIFÍCIOS

O ruído é parte da vida moderna e existem padrões formais que empregam medições do nível de pressão sonora para reconhecer ondas sonoras de alta frequência em níveis de sensibilidade, intrusão e perigo para seres humanos. De acordo com Finn Løvholt, do Instituto Geotécnico da Noruega (NGI), a geração de vibrações em edifícios devido aos infrassons é uma área de pesquisa que não foi explorada de modo extensivo. Por essa razão, o NGI — um centro internacional de pesquisa e consultoria no âmbito das geociências — tem conduzido programas investigativos há vários anos, em nome da Agência Estatal de Defesa da Noruega.

"Os sons de baixa frequência encontram menos absorção quando percorrem o ar, em relação aos sons de alta frequência, fazendo com que persistam por distâncias maiores. O nível de som transmitido de fora para dentro de edifícios é mais elevado. Estamos interessados em saber o que ocorre no limiar da audição", explicou

“Nunca obtivemos antes esse nível de coincidência com os testes do mundo real e tudo se resume a como fomos capazes de modelar os diferentes elementos estruturais no software COMSOL Multiphysics.”

– FINN LØVHOLT, NGI

Løvholt. "Queremos entender como os sons de fontes externas interagem com edifícios e geram vibrações percebidas pelas pessoas. Poderemos, então, recomendar contramedidas que evitem as vibrações e talvez propor unidades padronizadas que reconheçam a necessidade de que o fator 'incômodo' seja considerado."

⇒ SIMULANDO A DISPERSÃO DE ONDAS SONORAS

Løvholt e seus colegas decidiram criar um modelo computacional que lhes permitisse dividir o mecanismo das ondas sonoras de baixa frequência que atingem e entram em um edifício. Eles adotaram o software COMSOL Multiphysics® para simular uma estrutura de madeira com dois ambientes, separados por uma parede (veja a Figura 1, parte superior), imitando com boa precisão a configuração de experimentos em laboratório. Nesse modelo, eles designaram um alto-falante a um dos ambientes e um microfone ao outro, além de instalar várias sondas ao redor da estrutura, a fim de monitorar níveis de pressão sonora e vibrações. Cada componente foi modelado cuidadosamente, incluindo a moldura de aço, a cavidade de ar e pinos nas paredes, as janelas, as chapas de compensado e o drywall. "Cada elemento

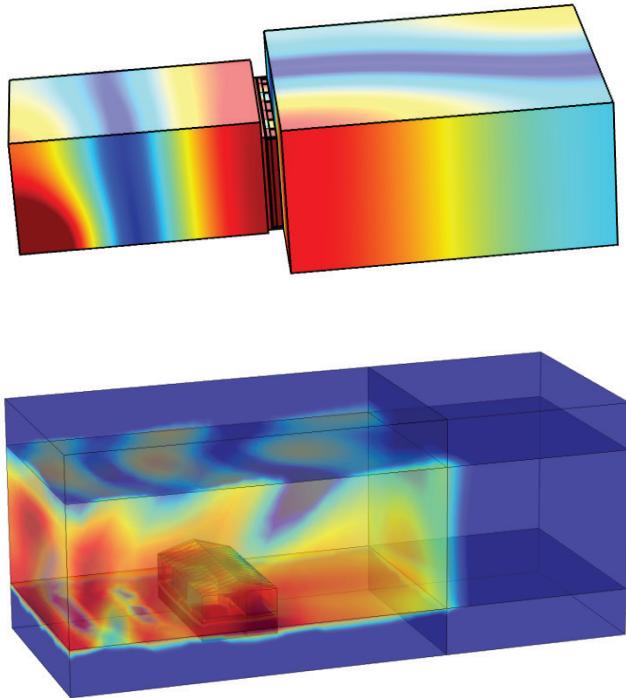


FIGURA 1. Parte superior: Pressão sonora simulada em laboratório, com duas câmaras divididas por uma parede. Um alto-falante foi colocado no ambiente da esquerda. As simulações mostram que as ressonâncias acústicas em cada ambiente afetam a isolamento acústica. Parte inferior: Som simulado de baixa frequência vindo das partes externa, circundante, e interna de um edifício. Em ambos os casos, as cores indicam a variação da pressão sonora dentro dos ambientes e nas cavidades da parede.

exibe uma ressonância, que depende do comprimento de onda sonora e da distribuição de pressão. Assim, por exemplo, há alta pressão no ambiente do alto-falante e menor pressão no ambiente do microfone; e a ressonância de uma parede irá depender de seus parâmetros, ou seja, comprimento, espessura e rigidez", explicou Løvholt.

A equipe teve, ainda, que reconhecer ressonâncias compostas, criadas com a junção de dois componentes, tais como dois pedaços de madeira parafusados entre si. "A vantagem do software COMSOL Multiphysics está no fato de permitir a inserção de todos os parâmetros que é preciso monitorar. Mas, especificamente, ele nos permite acoplar físicas, para

que possamos, por exemplo, observar a acústica do som a céu aberto interagindo com a dinâmica estrutural interna. Como o acoplamento atua nos dois sentidos, podemos identificar o feedback. Esse acoplamento é crucial para nossa análise porque as ondas sonoras podem gerar uma ampla gama e variedade de ressonâncias. O modelo nos permite realmente observar esses detalhes."

A equipe da NGI validou, então, a simulação com testes de sons de baixa frequência em laboratório, enquanto eram transmitidos através de uma construção de madeira com dois ambientes. Løvholt explicou que o movimento da parede e o nível de pressão sonora foram as principais grandezas medidas

e mostraram uma correlação bastante próxima com o modelo do software COMSOL Multiphysics (veja a Figura 2). "A resposta da parede real é bastante clara e o modelo foi capaz de fazer uma simulação bem aproximada. Esse é o aspecto mais espetacular."

O modelo mostra que a transmissão do som no interior de um edifício é regida pela forma como as ondas de baixa frequência interagem com os modos fundamentais dos componentes do edifício, pelas dimensões dos ambientes e pelo modo como o ar escapa do envelope formado pelo edifício. Vibrações em tetos e paredes parece ser a fonte dominante do som interno de baixa frequência; a vibração do piso é gerada pela pressão sonora no interior do ambiente.

⇒ MAIS BARATO E RÁPIDO QUE OS TESTES FÍSICOS

"Temos, agora, uma ferramenta para prever som e vibração em baixas frequências", afirmou Løvholt. "Podemos utilizá-la para projetar e testar medidas de redução, tais como laminação de janelas e aumento de rigidez das paredes; de fato, se uma parede ou janela se mover menos, irá ocorrer menor transferência de som. Além disso, o modelo nos mostra a influência de pequenos detalhes sobre o sistema — por exemplo, como a conexão parafusada entre pinos de fixação e drywalls pode reduzir os efeitos de uma contramedida, pois ela realmente diminui a rigidez global da estrutura."

O próximo estágio para a equipe envolve testes de campo em escala real, em uma casa real da Noruega que esteja exposta ao ruído de aeronaves. Enquanto isso, a equipe continuará usando e desenvolvendo o modelo. "Nunca havíamos obtido esse grau de coincidência com os testes físicos anteriormente e tudo se resumiu em como fomos capazes de modelar os diferentes elementos estruturais no COMSOL Multiphysics", conclui Løvholt. "O modelo nos permitiu tomar decisões e designar contramedidas, o que é muito mais barato e rápido que os testes físicos. O modelo poderá ser então expandido, para simular propagação do som e vibração em um edifício inteiro" (veja a Figura 1, parte inferior). ❖

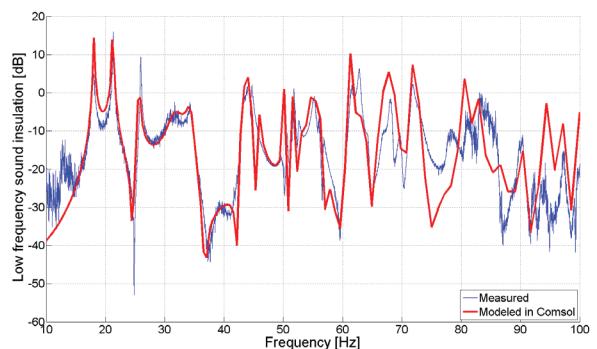


FIGURA 2. O modelo captura com exatidão os locais de ressonâncias, assim como o nível, com tolerância de alguns decibéis. Com o aumento da frequência, mais modos passam a ser excitados, em estruturas cada vez menores. Isto aparece como uma diferença crescente entre as medições e os resultados do modelo.

Na Vanguarda da Pesquisa de Aparelhos Auditivos

Os engenheiros da Knowles uniram a indústria de aparelhos auditivos para combater o retorno usando a simulação multifísica.

por **GARY DAGASTINE**

Nos Estados Unidos, quase 20% da população declaradamente tem problemas auditivos — embora esse número possa ser maior, pois várias pessoas relutam em admitir que possuem problemas de audição. As pessoas tratadas usam aparelhos auditivos discretos em miniatura para melhorar sua audição e, desta forma, sua qualidade de vida. Para levar um aparelho auditivo do estágio de protótipo à versão comercial, é necessário despender esforços de P&D significativos.

Os engenheiros enfrentam desafios técnicos diários para projetar aparelhos auditivos. O retorno é o principal problema que leva a ruídos ou apitos agudos e limita a quantidade de ganho que o aparelho pode fornecer. "Normalmente, o retorno ocorre quando o microfone do aparelho auditivo capta um som, ou vibração, que já está sendo direcionado para dentro do canal auditivo e envia de volta pelo amplificador, criando oscilações indesejáveis", explica Breno Varanda, engenheiro eletroacústico sênior da Knowles Corp. em Itasca, IL.

"Para vários clientes da Knowles, projetar um novo aparelho auditivo é um processo caro e demorado, que pode levar de 2 a 6 anos para finalizar", explica Varanda. A modelagem precisa ajuda os projetistas a escolher o alto-falante, refinar os suportes de isolamento de vibração e encapsular componentes para reduzir a quantidade de energia do alto-falante que retorna ao microfone. A indústria precisa urgentemente de modelos de transdutores simples para acelerar este processo e oferecer opções mais eficientes aos clientes. Os modelos completos de alto-falante e microfone são bastante complexos, e incorporam vários fatores que não são necessários para controlar o

retorno, "Apesar do entendimento da física eletromagnética, mecânica e acústica de nossos transdutores ser importante para os projetistas de transdutores da Knowles, toda essa complexidade não é necessariamente útil para nossos clientes", diz Varanda.

Como líder global e fornecedor do mercado de transdutores para aparelhos auditivos, áudio inteligente e componentes acústicos especiais, a Knowles tomou uma iniciativa multilateral para desenvolver modelos vibro-acústicos de transdutores que são fáceis de implementar e compatíveis com os clientes de aparelhos auditivos. O objetivo destes modelos é ajudar a levar os projetos de aparelhos auditivos do estágio do protótipo ao produto final de maneira mais eficiente, sem ter que sacrificar a precisão.

⇒ PROJETO DE APARELHOS AUDITIVOS E O RETORNO

Ao projetar aparelhos auditivos, os engenheiros devem considerar dois principais requisitos conflitantes. O aparelho deve ser compacto e discreto, e, ainda assim, capaz de fornecer saída de som poderosa para suprir a perda auditiva do usuário. A probabilidade do usuário utilizar um aparelho auditivo que é discreto e leve é muito maior. Isso torna a resolução do problema de retorno muito mais desafiadora. "Um desafio de projeto comum é incorporar todos os componentes de hardware no menor espaço possível sem causar instabilidade de retorno", continua Varanda.

Um típico aparelho auditivo usado por trás do ouvido (BTE) é compostopor um microfone para converter sons ambientes em sinais elétricos, um processador de sinal digital, um amplificador para processar e reforçar os sinais elétricos e um

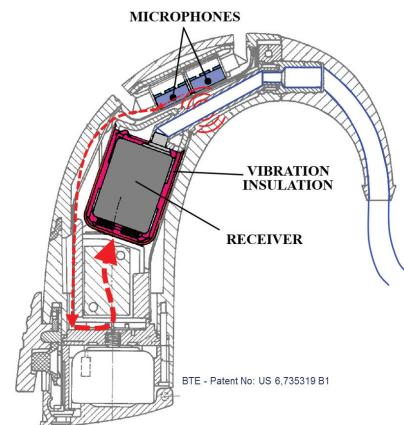


FIGURA 1. Um típico aparelho auditivo BTE inclui microfones, isolamento contra vibrações e um receptor, entre outros componentes. O espaço restrito para tais componentes gera um problemático feedback acústico e mecânico. (Crédito da imagem: Knowles Corp.)

pequeno alto-falante também conhecido como receptor (Figura 1). O receptor, ou alto-falante, "recebe" os sinais elétricos amplificados e os converte em energia acústica, ou som, que em seguida é canalizado no canal auditivo por um tubo ou molde do ouvido.

O receptor contém uma alavanca controlada eletromagneticamente, conhecida como palheta, conectada ao diafragma que gera som pelo seu movimento de oscilação. As forças eletromagnéticas internas também geram forças de reação que transmitem vibrações pelo encapsulamento do aparelho auditivo, criando som que é captado pelo microfone. Por sua vez, este sinal é ampliado pelo amplificador e devolvido novamente para o receptor, causando o retorno. Esse

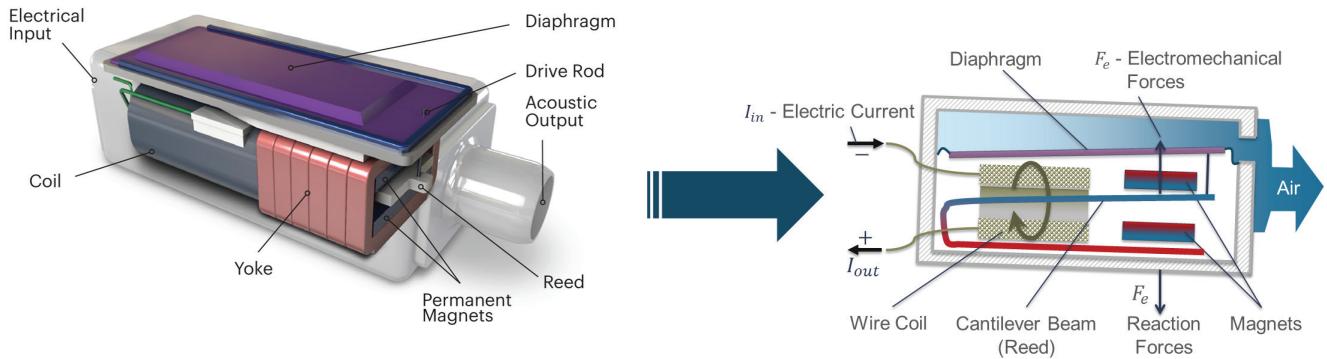


FIGURA 2. O receptor, um componente-chave do aparelho auditivo, contém um minúsculo fone de ouvido, com um diafragma controlado eletromagneticamente, que gera os sons. As forças eletromagnéticas internas geram vibrações estruturais que resultam em feedback.

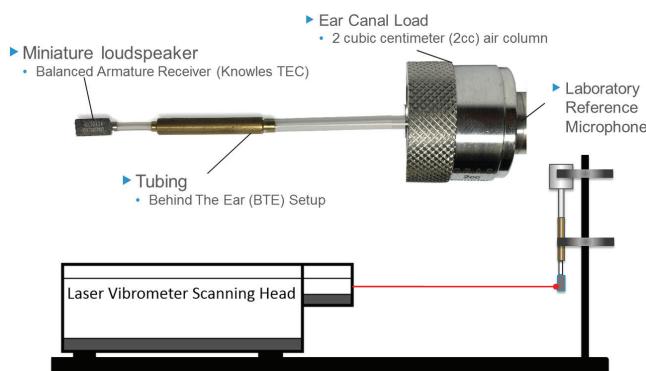


FIGURA 3. Elementos físicos e esquema da configuração experimental.

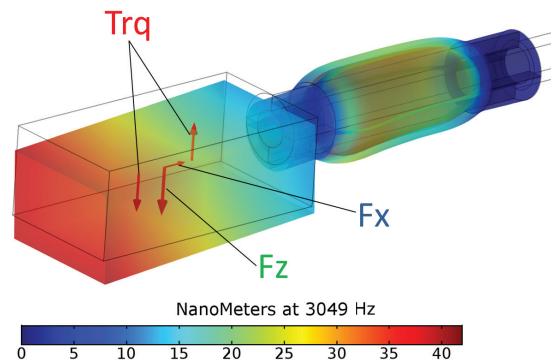


FIGURA 4. Resultados da força de simulação e deslocamento a 3 kHz do conjunto receptor e tubo de silicone..

caminho é mostrado na Figura 1.

⇒ O MODELO "CAIXA PRETA"

A única função do receptor é converter o sinal de tensão amplificado do microfone em som. Apesar da construção parecer simples, o processo é bastante complexo (Figura 2). Primeiro, o sinal elétrico é convertido em sinal magnético, em seguida, em sinal mecânico e, finalmente, em sinal acústico. Todos esses passos têm suas próprias características dependentes da frequência. Entender os efeitos combinados de todos os componentes internos é vital para poder projetar receptores efetivamente para todas as plataformas de aparelhos auditivos diferentes. Desde os anos 60, os engenheiros da Knowles têm usado circuitos equivalente complexos para modelar todos os efeitos elétricos-magnéticos-mecânicos-acústicos internos.

A modelagem precisa de toda a complexidade do receptor exige um modelo multifísico de elementos finitos assustadoramente grande e complexo,

tornando impraticável o projeto rápido e eficiente de aparelhos auditivos. Este problema foi superado quando o Dr. Daniel Warren, especialista em pesquisa de receptores e microfones da indústria de aparelhos auditivos, introduziu um modelo "caixa preta" em 2013. O projeto usa uma quantidade mínima de elementos de circuito simples para capturar a função de transferência eletroacústica entre o potencial elétrico e o nível de pressão sonora de saída para receptores de armadura balanceada, deixando de fora os fatores que não são importantes para controlar o retorno.

Um passo importante para simplificar o modelo, foi a demonstração de Warren e Varanda de que o circuito eletroacústico simplificado podia ser convertido num modelo vibro acústico poderoso, adicionando muito pouca complexidade ao modelo. "A conversão é realizada a partir da a seção do circuito "caixa preta" na qual a tensão através dos indutores é diretamente proporcional às forças mecânicas internas responsáveis pela

vibração estrutural", explica Warren.

Os modelos vibro acústico e "caixa preta" tinham que ser testados e validados em relação às conexões acústicas e mecânicas reais com o receptor, antes dos projetistas poderem começar a usá-los para projetar produtos. Em 2014 iniciou-se uma colaboração mundial entre a Knowles e seus clientes de aparelhos auditivos para validar os modelos usando o software COMSOL Multiphysics® e testes padrões da indústria.

⇒ TRABALHANDO JUNTOS PARA OBTER A VALIDAÇÃO

Para validar os modelos, os engenheiros precisavam medir a saída acústica e as forças de vibração simultaneamente, usando uma estrutura que pudesse ser facilmente modelada em FEA. Assim como nos testes comuns de aparelhos auditivos, este teste envolveu a conexão de um receptor a uma seção curta de tubulação que levava a uma cavidade fechada com volume de 2 centímetros cúbicos (2 cc), que é a carga

acústica do canal auditivo padronizada, conforme mostrado na Figura 3. A pressão acústica dentro da cavidade é medida usando um microfone de qualidade laboratorial. Para ajudar a verificar a robustez do modelo, o receptor também foi medido usando um conjunto de tubulação complexo, semelhante ao instrumento auditivo BTE. A tubulação deste projeto tem diâmetro variável e é longa o suficiente para permitir ressonâncias acústicas múltiplas. Ao mesmo tempo em que a saída acústica foi medida, o movimento estrutural do receptor foi capturado por um vibrômetro a laser. Os movimentos translacional e rotacional foram medidos observando-se o movimento em vários pontos da superfície da carcaça do receptor.

Para fazer as medições descritas, Warren e Varanda colaboraram com vários clientes da Knowles. Com a ajuda do software COMSOL Multiphysics, eles foram capazes de implementar o modelo de circuito vibro acústico simplificado a uma réplica simulada da configuração de teste descrita. A simulação acopla a interação mecânica entre o movimento do receptor e tubulação de

conexão de silicone, as perdas termoviscosas dentro das várias seções transversais da tubulação, as cargas de pressão acústica dentro da cavidade e a tubulação aos efeitos acústico-eletromagnéticos no modelo "black box" do receptor.

O modelo COMSOL revelou a dependência da pressão de saída e das forças mecânicas em relação a tensão aplicada, frequência e propriedades dos materiais. A Figura 4 mostra os resultados de deslocamento da simulação a 3 kHz e as forças de reação acopladas ao receptor.

Quando Varanda comparou os resultados das simulações com as medições físicas, eles demonstraram excelente correlação (Figura 5). As forças que agem no diafragma e palheta são acusticamente dependentes da pressão sonora de saída. Entretanto, conforme esperado, a relação entre as forças que agem no diafragma e as forças de reação estruturais é diretamente proporcional.

⇒ ESPALHANDO O CONHECIMENTO

A Knowles compartilha seu modelo para permitir que os engenheiros de outras empresas de aparelhos auditivos resolvam os problemas de retorno de seus próprios sistemas. Com uma representação completa do comportamento acústico, mecânico e eletromagnético dentro do hardware, os projetistas estão preparados para otimizar virtualmente seus produtos.

"O COMSOL é uma das poucas ferramentas de modelagem e simulação capazes de unir o circuito "caixa preta" à acústica e mecânica dos sólidos", diz Varanda. "Até o momento, verificar e otimizar os projetos de aparelhos auditivos era tão arte quanto ciência. Ficaremos muito felizes em ver novos

projetos de aparelhos auditivos que se beneficiaram destes modelos."

Ao unir forças, o esforço conjunto entre empresas facilitou a vida de todos no setor de aparelhos auditivos. "Finalmente, os projetistas de aparelhos auditivos não querem ficar atolados com modelos complexos de transdutores e simulações demoradas.

Eles querem simplesmente focar no seu próprio projeto e alternar os transdutores para ver como o conjunto todo funciona", adiciona. "Este modelo COMSOL os permite fazer isso. Os comportamentos de centenas de transdutores podem ser facilmente comparados para um único aparelho auditivo."

Agora, os projetistas de aparelhos auditivos são capazes de reduzir o retorno e melhorar o desempenho geral de forma mais rápida e mais econômica que anteriormente, oferecendo melhores opções para pessoas com problemas auditivos. ❖

Com a simulação multifísica, os projetistas de aparelhos auditivos foram capazes de reduzir o retorno e melhorar o desempenho geral de forma mais rápida e mais econômica que anteriormente, o que levou a melhores opções para pessoas com problemas auditivos.



Brenno Varanda, Engenheiro Eletroacústico Sênior, Knowles Corp.

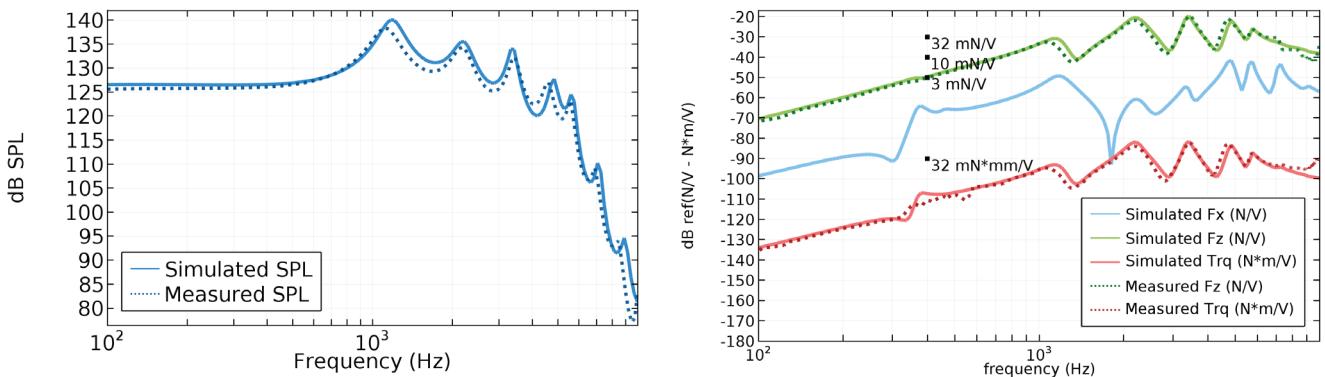


FIGURA 5. Esquerda: Nível de pressão sonora medida (linha pontilhada) vs. simulada (linha sólida) dentro de um acoplador de 2 cc. Direita: Forças e torque medidos (linha pontilhada) vs. simulados (linha sólida) agindo no receptor.

A ANÁLISE MULTIFÍSICA APRIMORA A DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM ADUTORAS

Prever a velocidade do som é importante para localizar de forma precisa vazamentos em tubulações enterradas como adutoras. A Echologics Engineering implementou um modelo de simulação baseado em elementos finitos para determinar o comportamento acústico em tubulações e estimar variações de velocidade do som.

por VALERIO MARRA

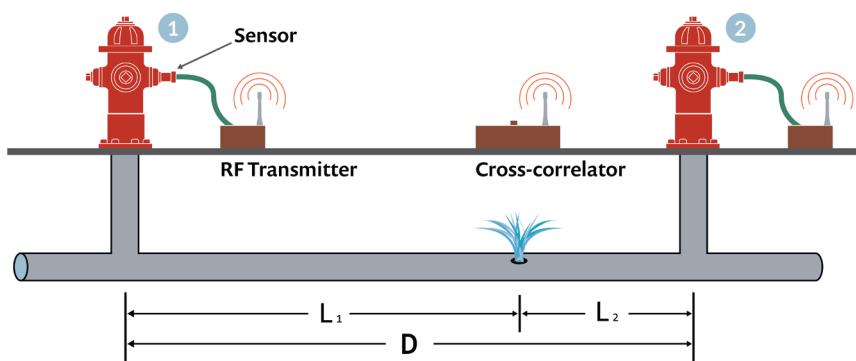


FIGURA 1. Esquerda: Tubo com vazamento sob investigação. Direita: Esquema de configuração de detecção de vazamento. Um vazamento é delimitado por 2 sensores cuja distância é D . O som se propaga nos dois sentidos e um correlacionador mede o tempo que leva para atingir cada sensor. A velocidade do som na tubulação permite localizar exatamente o vazamento.

Água fresca e limpa é um bem precioso que as cidades não podem desperdiçar com vazamentos em tubos subterrâneos. Conforme a infraestrutura da tubulação envelhece, fica mais difícil descobrir vazamentos. E conforme o valor da água aumenta, descobrir vazamentos se torna mais importante.

É aí que entra em cena a Echologics, uma divisão da Mueller Canadá, Ltd. com sede em Toronto, com sua tecnologia exclusiva de detecção de vazamentos não invasiva. "Vazamentos fazem barulho", explica Sebastien Perrier, cientista de acústica de P&D da Echologics. Perrier é engenheiro mecânico especializado em acústica, vibrações, acoplamento de estruturas e processamento de sinais. "Os tubos falam e, se você escutar, eles dizem onde ficam os vazamentos", ele diz.

A Echologics mede o tempo de voo do som usando uma função de correlação e sensores acústicos instalados nos tubos ou Hidrantes de incêndio. Se há um

vazamento em algum lugar entre os dois sensores, o vazamento é detectado e o resultado da correlação é usado para determinar a diferença de tempo que o ruído do vazamento leva para atingir cada sensor. Isso fornece a distância do vazamento até cada sensor, pois a velocidade do som nos tubos investigados é conhecida (Figura 1).

Líder em inovações de sistemas acústicos para infraestrutura de água, a Echologics desenvolve tecnologias que exploram esta correlação para encontrar vazamentos e para monitorar continuamente as tubulações. Exemplos de produtos da Echologics incluem o correlacionador de ruído de vazamento LeakFinderST™ (Figura 2) e o sistema de monitoramento de tubulações EchoShore®-DX (Figura 3). Os correlacionadores da Echologics permitem que os especialistas de campo investiguem vazamentos em vários tubos, usando transmissores, sensores e uma interface do usuário que pode ser instalada num laptop padrão. Esta tecnologia acústica

é capaz de detectar até mesmo vazamentos pequenos nos estágios iniciais de formação, economizando recursos municipais e evitando danos, pois os vazamentos são monitorados conforme eles crescem e é possível tomar ações corretivas rapidamente.

A tecnologia responsável os produtos da Echologics exige entendimento preciso da velocidade do som em diferentes tipos de tubos. Ela depende do material, é proporcional à rigidez do tubo e é influenciada pela geometria da tubulação. "A chave era desenvolver uma tecnologia sensível o suficiente para permitir a detecção de vazamentos em tubos de PVC", explicou Perrier. O plástico apresenta alta atenuação e amortecimento se comparado ao metal. Ainda mais complicado é o fato de que sistemas de água antigos, feitos originalmente de tubos de ferro fundido, estão sendo reparados, em segmentos específicos, com plástico.

Manter os sofisticados algoritmos de correlação acústica atualizados e precisos



FIGURA 2. O correlacionador de ruído de vazamento LeakFinderSTM™ é compacto e intuitivo.



FIGURA 3. O sistema EchoShore®-DX transforma os hidrantes de incêndio existentes em tecnologia inteligente de detecção de vazamentos.

é uma das responsabilidades de Perrier. Ele deve compreender os fundamentos da física envolvida para otimizar e desenvolver soluções de última geração para infraestruturas de tubos enterrados. Para ajudar a acelerar o processo de projeto e compartilhar suas descobertas com os outros departamentos, Perrier cria modelos acústicos computacionais e cria aplicativos de simulação baseados neles.

⇒ DETECÇÃO DE VAZAMENTOS ANTES QUE CAUSEM FALHAS

Como a simulação numérica ajuda a prever a propagação de ondas acústicas em tubos? A análise da rede de tubulação pode ser complexa e demorada. Pode ser necessário estudar a resposta de propagação do som e vibração da perspectiva de um único tubo ou de toda a rede. Portanto, a complexidade do modelo e o tempo que leva para rodar a análise podem mudar consideravelmente, conforme o nível

de detalhe necessário para que a física envolvida no modelo seja precisa.

Garantir que a velocidade de propagação do som seja precisa em cada segmento de tubo é o cerne do problema que Perrier resolveu no estágio inicial do projeto. Então, ele adotou a simulação multifísica para ter acesso mais rápido aos valores relevantes a seu trabalho. Na análise de redes de tubos, é necessário o acoplamento entre acústica, escoamento e mecânica estrutural.

No trabalho de Perrier, há vários usos para simulação. Por exemplo, compreender as margens tênues de erro e ajuste fino da tecnologia. Explorar os parâmetros do material e geometria de uma rede de tubos por meio de simulação acústica revela previsões para diferentes cenários. A simulação acústica exibe a presença de ruído no sinal quando a distância dos sensores varia, ou indica que deve ter ocorrido um reparo com plástico que não foi incluído no teste. A simulação de Perrier também prevê a pressão numa

rede de tubos conforme a onda acústica viaja até o sensor, além do amortecimento mecânico considerando seções de materiais diferentes, oferecendo uma maneira de visualizar o problema (Figura 4).

⇒ USO ROTINEIRO E APLICATIVOS DE SIMULAÇÃO

Com o uso rotineiro de modelos computacionais, Perrier viu a vantagem de construir um aplicativo de simulação personalizado. Com base na análise do COMSOL Multiphysics® e usando as ferramentas do software, ele criou seu próprio aplicativo, que combina interação acústica-estrutura, acústica em dutos e estudos no domínio do tempo e da frequência. (Figura 5). O aplicativo permite que o usuário altere a geometria e as propriedades do material várias vezes para analisar um segmento do tubo ou toda a rede.

Usando o aplicativo, o usuário pode definir uma rede de adutoras especificando o comprimento dos segmentos, número de segmentos e as características do tubo. A velocidade do som é calculada de acordo com as propriedades do material, a partir de uma lista predeterminada, tal como ferro fundido ou plástico. Em seguida, a simulação incorpora os resultados das medições de campo, que o usuário digita manualmente conforme as correlações para prever o local dos vazamentos.

Transformar o modelo multifísico num aplicativo de simulação é conveniente para interagir com outras pessoas na empresa. “A criação de aplicativos de simulação me permite compartilhar modelos complexos com colegas e torná-

“A criação de aplicativos de simulação me permite compartilhar modelos complexos com colegas e torná-los acessíveis de qualquer lugar”

– SEBASTIEN PERRIER, P&D CIENTISTA ESPECIALIZADO EM ACÚSTICA DA ECHOLOGICS

los acessíveis de qualquer lugar”, diz Perrier. Os aplicativos de simulação podem ser protegidos por senha e implementados com uma instalação local do produto

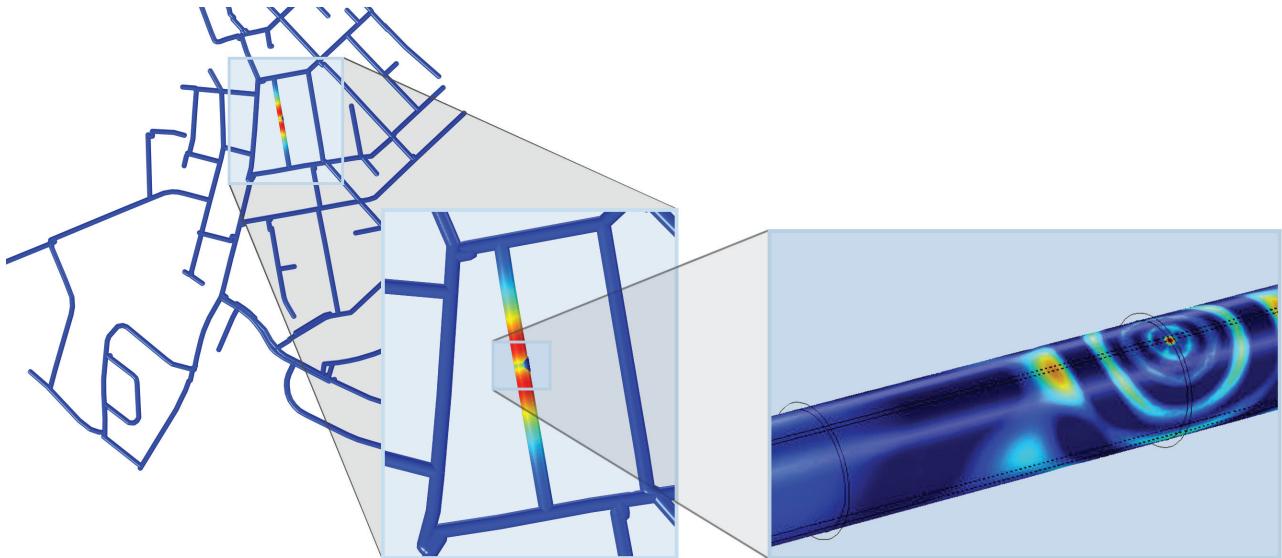


FIGURA 4. Análise de propagação do som do ruído de um vazamento numa rede de tubos. O gráfico mostra a pressão acústica na área ao redor do vazamento.

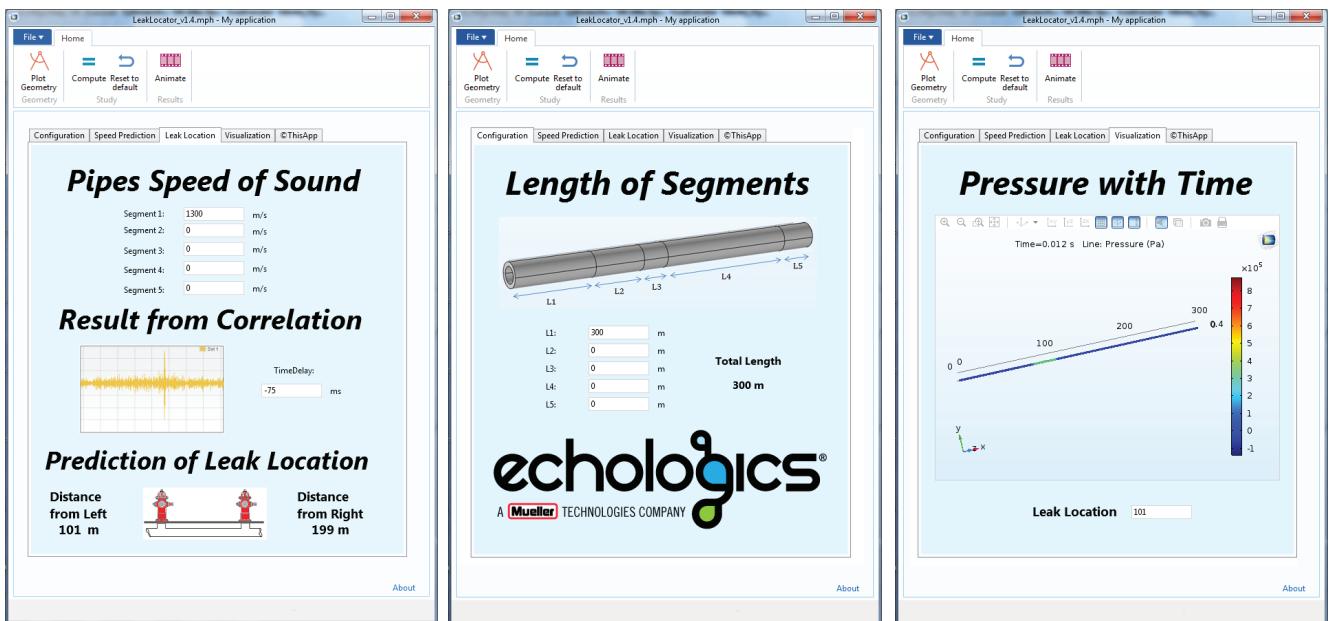


FIGURA 5. A interface simples guia o usuário para prever o local preciso do vazamento, definidas as características do tubo e da geometria. O aplicativo calcula a velocidade do som no tubo e permite que o usuário visualize, com uma animação, a propagação do som a partir do local do vazamento, enquanto oculta os cálculos complexos da interação acústica-estrutura e de previsão da localização.

COMSOL Server™, permitindo a rápida atualização de aplicativos e manutenção da confidencialidade. Este foi o principal atributo para ele, já que a maior parte de seu trabalho é confidencial. Ele criou o aplicativo para que pudesse ser usado pelos engenheiros de campo, no local.

Ele espera que o aplicativo seja amplamente usado na Echologics. A ideia é que os engenheiros de campo da

Echologics detectem os vazamentos de forma rápida e precisa sem compreender detalhadamente a mecânica ou matemática por trás da simulação. Na visão de Perrier, a simulação é uma ferramenta poderosa que mostra a propagação do som e que permite aos usuários verificarem se a velocidade do som aumenta ou diminui quando há mudança na geometria ou propriedades dos materiais. ❖



Sebastien Perrier, cientista especializado em acústica, P&D da Echologics

Música Para Seus Ouvidos: Novos Transdutores Para Fones de Ouvido Eletrostáticos



Uma startup de tecnologia de áudio fornece novos transdutores manufaturáveis para fones de ouvido eletrostáticos de alta qualidade e reduz a queda dos graves.

por **JENNIFER HAND**

Entusiastas de áudio de alta fidelidade ficam empolgados com a experiência musical oferecida por fones de ouvido eletrostáticos. Com som natural e arejado, eles fornecem maior clareza, menos distorção e maior largura de banda quando comparados a outros tipos de fones de ouvido no caso de fontes de áudio de alta resolução.

A maioria dos alto-falantes eletrostáticos aplica uma carga elétrica numa membrana elástica fina localizada entre duas placas condutivas. A membrana carregada se move em resposta direta aos sinais elétricos, gerando ondas de som que nossos ouvidos e cérebro interpretam como música e nos trazem alegria ou nos levam às lágrimas.

Apesar da sua reprodução de áudio precisa e de alta qualidade, os falantes eletrostáticos podem ser proibitivamente caros, algumas vezes frágeis, e até recentemente eram feitos artesanalmente devido aos requisitos de precisão mecânica. Percebendo a necessidade de fones de ouvido de alta qualidade acessíveis, que pudessem ser fabricados de maneira mais fácil, a Warwick Audio Technologies Limited (WAT) projetou o transdutor HPEL (Laminado Eletrostático de Alta Precisão), uma tecnologia patenteada que se baseia num diafragma ultrafino e uma única placa condutiva em vez de um par delas. Originada na Universidade de Warwick, no Reino Unido, a WAT desenvolveu uma membrana laminada leve, com somente 0,7 mm de espessura que é perfeita para fones de ouvido eletrostáticos.

Os novos HPELs são estruturas leves de filmes finos fabricados por meio de

um processo de rolagem contínua. "A tecnologia que desenvolvemos é única", explica Martin Roberts, CEO da WAT. "O transdutor HPEL é composto por uma película de polipropileno metalizada, um polímero espaçador com células hexagonais e uma malha condutiva" (Figura 1).

Em vez da configuração típica, na qual a corrente contínua (CC) é aplicada à membrana elástica e a corrente alternada (CA) é aplicada às placas adjacentes, o seu falante unilateral emprega corrente CC na membrana elástica um sinal CA aplicado a uma única malha de fios que fica apoiada sobre a membrana.

O método de fabricação permite reproduzir os transdutores com custo significativamente inferior ao de falantes eletrostáticos tradicionais. Isso significa que, pela primeira vez, falantes eletrostáticos podem ser considerados uma opção de áudio de alta resolução viável numa ampla gama de tipos de dispositivo e segmentos de mercado.

⇒ SIMULAÇÃO DE REPRODUÇÃO ACÚSTICA

Para desenvolver estes transdutores, que podem ser fabricados facilmente a

baixo custo sem comprometer a qualidade do som, a equipe da WAT investigou cuidadosamente a influência de vários elementos de projeto antes de definir a versão final. "Desenvolvemos vários protótipos que claramente tiveram bom desempenho. O grande problema era que não tínhamos certeza sobre como a variação de materiais e parâmetros de projeto específicos afetariam o desempenho do

transdutor", afirma Roberts.

A dinâmica do HPEL depende da interação extremamente complexa entre a tensão da membrana, nível do sinal CA, geometria do falante, propriedades elásticas e dielétricas do material, perdas termoacústicas e efeitos da massa de ar no lado aberto da membrana. Os projetistas queriam melhorar

o desempenho dos graves reduzindo a queda, minimizando a distorção e maximizando o nível de pressão sonora para um determinado sinal elétrico. Entretanto, eles descobriram que pequenas alterações em quaisquer componentes afetavam consideravelmente a acústica.

Apesar da WAT ter experiência mecânica, elétrica e acústica significativa, ela não

“ Passamos da confecção manual de vários protótipos a cada semana a simplesmente inserir um novo modelo no software. Além de definir uma concepção final totalmente satisfatória, agora é fácil personalizar nossos transdutores de acordo com os requisitos do cliente.”

— MARTIN ROBERTS, CEO DA WAT



FIGURA 1. De cima para baixo: Transdutores HPEL da WAT: vista simples do laminado, desenho de conjunto e vista explodida de um transdutor HPEL acabado. Todos os laminados são feitos no Reino Unido.

possuía recursos internos de simulação para ajudar a entender esta interação. Para realizar a otimização virtual do projeto do transdutor HPEL, eles solicitaram a ajuda da Xi Engineering, um consultor certificado da COMSOL especializado em modelagem computacional, recomendações de projeto e resolução de problemas de ruído e vibração em maquinários e outras tecnologias.

Dr. Brett Marmo, Diretor Técnico da Xi Engineering, supervisionou o desenvolvimento dos modelos no software COMSOL Multiphysics® utilizados para

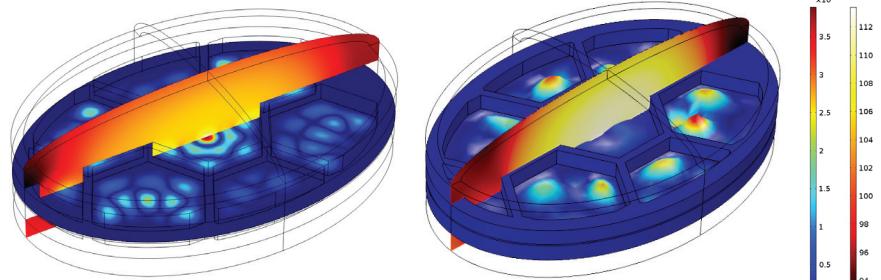


FIGURA 2. Simulação mostrando o nível de pressão sonora (superfície com cores térmicas) em dB e o deslocamento da membrana (superfície com cores do arco íris) em mm de um modelo acústico MEMS totalmente acoplado, resolvido no domínio de frequência. Esquerda: solução a 5.000 Hz. Direita: solução a 5.250 Hz.

analisar o comportamento do transdutor HPEL. O software permitiu que a Xi Engineering modelasse os efeitos não lineares que surgiriam com as alterações do projeto assimétrico do HPEL.

"Simplificamos o modelo inicial, focando nas especificidades que influenciam a qualidade sonora, por exemplo, mantendo a primeira harmônica a mais baixa possível para entender a interação acústica-estrutura e analisar o desempenho do HPEL em baixa frequência", explica Marmo, descrevendo os testes preliminares. "Nosso modelo mostrou como a tensão aplicada afetava o nível dos sinais, o que ajudou a entender a distorção sonora em um caso inicial."

Como o transdutor é unilateral, a força eletrostática varia com a posição da membrana vibrante, reduzindo com o quadrado da distância entre a membrana e a malha. Depois de entender a distorção não linear resultante e conseguir prever seus efeitos, os engenheiros da WAT foram capazes de cancelar todas as distorções.

⇒ APERFEIÇOAMENTO DO PROJETO DO TRANSDUTOR HPEL

Numa simulação mais abrangente que envolveu acoplamento estrutural-MEMS-acústico, ele examinou o impacto do ajuste de parâmetros como o tamanho das células hexagonais da malha, espessura dos fios, tensão da membrana, espaçamento entre a membrana e a malha e as propriedades do material de cada componente. Marmo e seus colegas também estudaram os efeitos de diferentes desvios CC, que normalmente são responsáveis por distorção a baixas frequências, e analisaram a condutividade ao longo da placa para determinar se havia diferença de tensão entre uma área

e outra. Em seguida, usaram COMSOL para estudar as perdas termoacústicas e modelar o deslocamento da membrana em frequências diferentes (Figura 2).

"Descobrimos que este tipo de simulação era a única maneira precisa de modelar transdutores eletrostáticos de forma realista", continua Marmo. "Neste caso, a modelagem por parâmetros concentrados é capaz de caracterizar aspectos limitados de desempenho, tais como resposta de amplitude em baixa frequência. Um parâmetro pode ser excelente, mas pode criar distorção significativa em outro local. A modelagem multifísica engloba todas as dimensões que afetam nossa percepção do som, tais como a resposta no domínio do tempo e a distorção não linear."

As simulações permitiram que os engenheiros da WAT ajustassem os parâmetros de projeto para otimizar o desempenho geral. Finalmente, eles foram capazes de prever o que estava causando picos na resposta em frequência e suavizar o sinal para melhorar a fidelidade.

"Isso resultou numa grande redução de tempo e custo", afirma Roberts. "Passamos da confecção manual de vários protótipos a cada semana a simplesmente projetar um novo no software. Além de definir o projeto final que nos satisfizesse, ficou fácil personalizar nossos transdutores de acordo com os requisitos específicos dos clientes."

A equipe de Marmo comparou todos os modelos com as medições físicas fornecidas pela equipe de projeto da WAT. "Os resultados das simulações foram surpreendentemente próximos às medições experimentais", comenta Dan Anagnos, CTO da WAT.

"Este foi, provavelmente, o aspecto mais empolgante: ver a simulação ganhar vida e saber que estava fornecendo um retrato

preciso do desempenho do falante."

⇒ **LIBERDADE E FLEXIBILIDADE COM UM APLICATIVO DE SIMULAÇÃO**

Com os resultados da simulação confirmados e a VAT satisfeita com seu projeto, o próximo passo da Xi Engineering foi colocar a WAT no controle das futuras modelagens. O Application Builder, disponível no software COMSOL, permitiu que a equipe de Marmo criasse um aplicativo a partir de sua simulação e o hospedasse online.

A interface do aplicativo permite que os usuários alterem determinadas entradas para testar modificações em vários parâmetros, tais como desvio CC, nível do sinal CA, faixa de frequência e resolução, propriedades dos materiais, tamanho do alto-falante, formato e tamanho da malha e posicionamento do espaçador (Figura 3). A configuração da simulação não pode ser acessada a partir do aplicativo. Em vez disso, ele permite que os usuários rodem testes adicionais sem ter que aprender a usar o software.

"O fornecimento de um aplicativo de simulação à WAT eliminou a necessidade de que adquirissem o software ou designassem um usuário experiente." afirma Marmo.

"Os aplicativos de simulação colocam nossos clientes no controle. Eles não precisam nos consultar para realizar pequenas alterações e são capazes de testar o que quiserem. Isso também nos permite explorar novos desafios em vez de trabalhar em variações do mesmo problema." A Xi Engineering espera usar os aplicativos computacionais cada vez mais, no desenvolvimento dos seus trabalhos para outros clientes.

A WAT está fazendo o mesmo: compartilhando o aplicativo com seus próprios clientes — empresas que querem descobrir o transdutor HPEL mais adequado a seus respectivos fones de ouvido. "A equipe da Xi Engineering foi excelente. Eles têm grande experiência e nos ajudaram a compreender a complexidade de nosso produto", acrescenta Roberts. "O aplicativo intuitivo que a Xi desenvolveu para nossa empresa é um bônus adicional. Sem revelar qualquer propriedade intelectual, podemos permitir a nossos clientes acesso ao nosso projeto através do aplicativo para que possam testar e incorporar a tecnologia em seus próprios fones de ouvido de alta qualidade." ❖

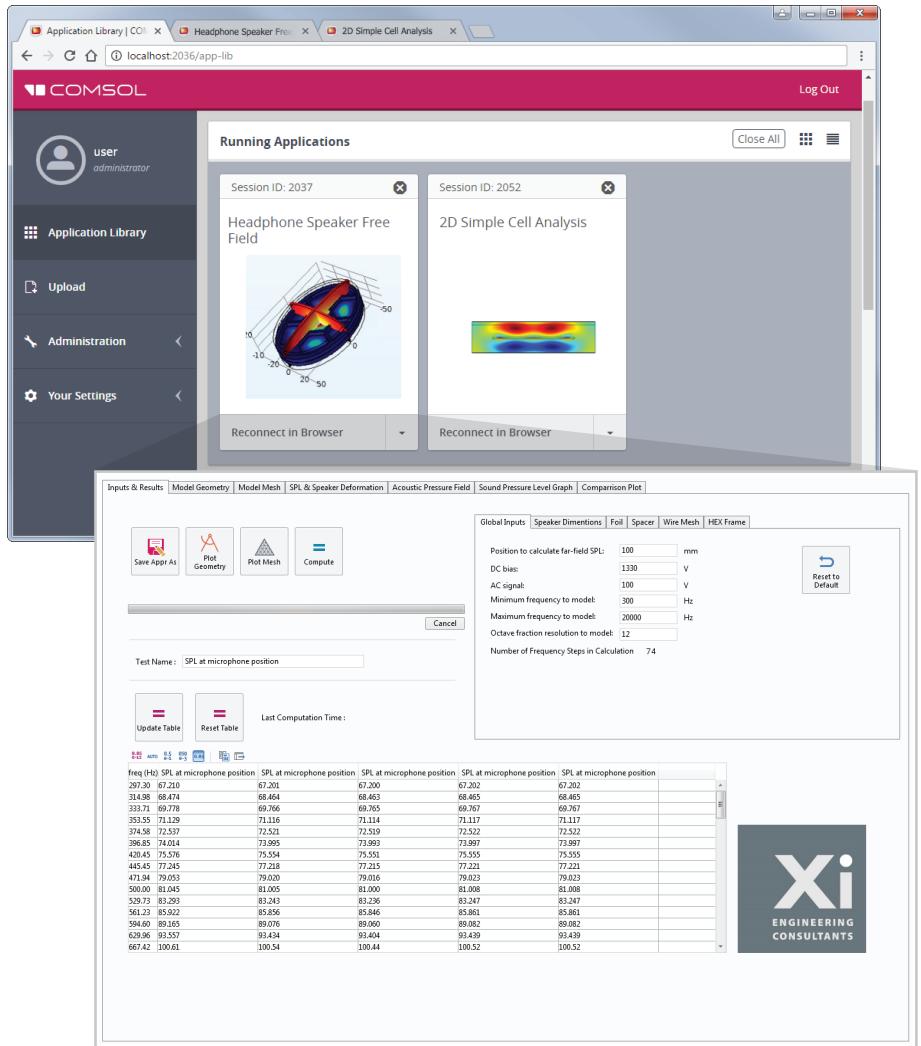


FIGURA 3. Frente: O aplicativo desenvolvido pela Xi Engineering permite que os engenheiros alterem parâmetros relacionados à frequência, entrada elétrica, dimensões do falante e propriedades da membrana, espaçador e malha. Os resultados fornecem os níveis de pressão sonora para diferentes casos, deslocamento da membrana, resposta em frequência a diferentes desvios CC e uma comparação entre o projeto simulado e os resultados experimentais. Fundo: O aplicativo é compartilhado pelo COMSOL Server™ e pode ser acessado usando um navegador de internet.



Esquerda: Brett Marmo, Diretor Técnico da Xi Engineering. Centro: Martin Roberts, CEO, Warwick Audio Technology. Direita: Dan Anagnos, CTO, Warwick Audio Technology.

Simulando o Mundo Através das Lentes da Multifísica

As aplicações do mundo real são inerentemente multifísicas e devem ser tratadas como tal.

por **ED FONTES**

Um aspecto exclusivo do software COMSOL® é o modo como ele recebe dados do usuário e gera um modelo matemático, composto por equações diferenciais, para descrever fenômenos físicos. Atualmente, qualquer software de CAE baseia-se em modelos numéricos predefinidos, que são aproximações de equações diferenciais. Essas aproximações são necessárias na medida em que, em muitos casos, não é possível resolver as equações diferenciais analiticamente – ou seja, não se pode determinar uma solução exata. Ao invés disso, utilizam-se diferentes tipos de discretização, tais como métodos de diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos (entre outros), para fazer uma aproximação das equações diferenciais relevantes. É difícil acrescentar fenômenos e descrições de variáveis e acoplamentos multifísicos a um modelo numérico caso não sejam considerados nas equações diferenciais desde o início. O COMSOL difere dos outros tipos de software no fato de gerar um modelo matemático completo rapidamente, com base nos dados inseridos pelo usuário e antes que a discretização seja criada, quando o usuário clica sobre o botão Resolver. Essa tecnologia essencial permite que os usuários criem seus próprios acoplamentos multifísicos e expressões, utilizando os nomes de variáveis e coordenadas e digitando diretamente as

expressões matemáticas na interface de usuário. Em um software tradicional, as descrições que foram integradas devem ser feitas em nível numérico e, após a discretização, utilizando sub-rotinas definidas pelo próprio usuário – que podem ser imprecisas e/ou difíceis de produzir.

O software COMSOL possui uma interface intuitiva, pela qual o usuário pode inserir expressões matemáticas arbitrárias, descrevendo propriedades de materiais, cargas, fontes, vínculos e acoplamentos multifísicos. Parece um tipo de paradoxo, já que a matemática é vista como algo difícil, mas nosso software realmente viabiliza criar modelos matemáticos bastante complexos de modo rápido. Os recursos de modelagem matemática do programa COMSOL são transparentes, fáceis de usar e altamente adaptáveis às necessidades específicas do usuário.

Pesquisadores e cientistas podem ter uma profunda compreensão ou intuição sobre processos ou fenômenos em seus respectivos campos de especialização e, em muitos casos, sem serem especialistas em modelagem matemática. É importante que tal compreensão ou intuição seja empregada também ao se construir modelos e executar simulações, já que

isto resulta em modelos mais precisos e projetos melhores. Por essa razão, a COMSOL oferece o Application Builder, para a criação de apps com interfaces de usuário personalizadas, para fins específicos. Esses apps permitem que especialistas e leigos em modelagem matemática validem modelos e se beneficiem com isso, ao otimizar e desenvolver novos processos e projetos.

Um dos exemplos desse processo é o da empresa Mahindra Two Wheelers (descrito na página 15). Ela empregou simulações para estudar o desempenho de ruído e vibração nos sistemas de motor, admissão e exaustão de motocicletas. Ulhas Mohite, gerente de P&D da Mahindra, nos informou que "a empresa criou um app de simulação, no software COMSOL Multiphysics®, para comparar arquivos de resultados de análises e plotar dados do nível de pressão sonora, o que nos economizou muito tempo." Nesse caso, eles resolveram um problema de acústica e utilizaram o app simultaneamente para comparar e analisar dados de simulação.

Os usuários nos surpreenderam com seus projetos e usos criativos para apps, que nós mesmos não podíamos prever; estudar e analisar o feedback desses usuários foi crucial no lançamento de vários outros novos recursos do software. Todo o desenvolvimento que já fizemos e ainda vamos fazer no software tem o objetivo de facilitar a adoção de simulações numéricas precisas já nos primeiros estágios de projeto, a fim de entender fenômenos físicos e otimizar projetos de modo melhor e mais rápido. O cerne da concepção de nosso software reflete nossa filosofia de estudar fenômenos do mundo real através das lentes de alta fidelidade de simulações e modelos multifísicos. ❖

LINHA DE PRODUTOS

- › COMSOL Multiphysics®
- › COMSOL Server™

ELETROMAGNETISMO

- › AC/DC Module
- › RF Module
- › Wave Optics Module
- › Ray Optics Module
- › Plasma Module
- › Semiconductor Module
- › MEMS Module

ESTRUTURAL E ACÚSTICA

- › Structural Mechanics Module
- › Nonlinear Structural Materials Module
- › Geomechanics Module
- › Fatigue Module
- › Multibody Dynamics Module
- › Rotordynamics Module
- › Acoustics Module

FLUIDOS E CALOR

- › CFD Module
- › Mixer Module
- › Subsurface Flow Module
- › Pipe Flow Module
- › Microfluidics Module
- › Molecular Flow Module
- › Heat Transfer Module

QUÍMICA

- › Chemical Reaction Engineering Module
- › Batteries & Fuel Cells Module
- › Electrodeposition Module
- › Corrosion Module
- › Electrochemistry Module

USO GERAL

- › Optimization Module
- › Material Library
- › Particle Tracing Module

INTERFACE

- › LiveLink™ for MATLAB®
- › LiveLink™ for Excel®
- › CAD Import Module
- › Design Module
- › ECAD Import Module
- › LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- › LiveLink™ for Inventor®
- › LiveLink™ for AutoCAD®
- › LiveLink™ for Revit®
- › LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- › LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- › LiveLink™ for Solid Edge®
- › File Import for CATIA® V5

Como a Acústica Computacional se Beneficia com a Multifísica

por **NAGI ELABBASI, VERYST ENGINEERING**

O campo da acústica é bastante diversificado, assim como a necessidade de ferramentas computacionais de suporte a ele. A simulação acústica é muito comum em aplicações tais como controle de ruído automotivo, acústica de ambientes, alto-falantes, fones de ouvido miniaturizados, instrumentos musicais, sensores e atuadores acústicos e testes não destrutivos. Ela oferece informações valiosas e oportunas aos engenheiros, que ajudam a otimizar seus produtos e avaliar novos conceitos de projeto. Na Veryst Engineering, encontramos um interesse crescente em simulação acústica — especialmente em aplicações que envolvem dispositivos médicos e sensores tipo MEMS.

As formulações adequadas à acústica computacional variam significativamente para algumas das aplicações mencionadas acima. Em muitos casos, não é possível resolver o problema acústico em separado de outras físicas, principalmente estrutural, de fluidos, elétrica, de transferência de calor e de meio porosos. Esse acoplamento multifísico entre acústica e outros fenômenos costuma ficar mais significativo conforme os dispositivos ficam menores.

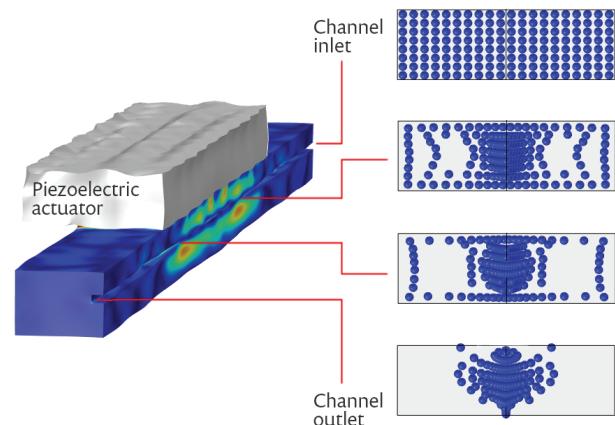
O que acho empolgante hoje é o número crescente de aplicações acústicas que vejo, especialmente em duas áreas de grande influência: dispositivos médicos e tecnologias vestíveis.

Trabalhamos recentemente com um problema de simulação acústica multifísica, no âmbito do setor de dispositivos médicos: um dispositivo tipo 'lab-on-a-chip' para focalização de fluidos corporais utilizando acustoforese. Esse método envolve o movimento de partículas devido a um campo acústico oscilante, sendo empregado em aplicações como lavagem de fluidos, separação de fluidos e levitação acústica. Esse modelo específico envolve acústica de pressão, mecânica dos sólidos, campos elétricos, escoamento de fluidos e rastreamento de partículas. A geometria e as propriedades de partículas utilizadas neste exemplo de modelo foram obtidas na literatura disponível. A figura mostra a distribuição de partículas ao longo do canal, demonstrando o foco efetivo dessas partículas em direção ao centro do canal. O modelo computacional ajuda os projetistas a selecionar dimensões, materiais, frequências de operação e vazão do fluido no dispositivo.

Dois desafios que são comumente enfrentados no caso de simulações acústicas, não muito diferentes de outras físicas, consistem em obter propriedades exatas dos materiais e a validação do modelo. Na minha experiência, amortecimento é uma das propriedades mais difíceis de se avaliar em problemas acústicos. Caso um atuador acústico opere nas proximidades de uma frequência de ressonância (o que ocorre com frequência), o efeito do amortecimento será significativo sobre os resultados. Se o dispositivo envolver componentes poliméricos (o que também ocorre com frequência), é quase certo que o amortecimento será dependente da frequência. Uma única medição de amortecimento fornecida pelo fabricante, tal como fator Q ou fator de perda, não será realmente suficiente para

uma análise precisa. É preciso fazer, então, com frequência, mais testes de materiais e testes em nível de dispositivos.

Para superar esses desafios e outros, passamos a desenvolver mais apps de simulação para clientes. Utilizando o Application Builder disponível no software COMSOL Multiphysics®, temos condições de criar aplicativos com uma interface de usuário intuitiva e totalmente personalizada, com base nas necessidades de cada cliente. Esperamos que esses apps propiciem aos leigos em simulação, um acesso direto aos benefícios da acústica computacional, através de uma simples interface de usuário. Os clientes poderão, assim, fazer experimentos com parâmetros ou sugerir iterações de projeto com base em seu conjunto específico de habilidades. O campo da acústica tem evoluído consideravelmente graças ao poder da simulação multifísica e esperamos ansiosamente a expansão dessa área através do desenvolvimento dos apps de simulação.



Focalização de partícula acustoforética em um microcanal, simulado com o software COMSOL Multiphysics®. Vê-se também a deformação e a tensão de von Mises.



SOBRE O AUTOR

O Dr. Nagi Elabbasi é engenheiro-chefe da Veryst Engineering, LLC e sua principal área de especialização é a modelagem de sistemas multifísicos. Ele tem ampla experiência na simulação de mecânica estrutural, CFD, transferência de calor, acústica e sistemas acoplados, assim como no desenvolvimento de programas de elementos finitos. Ele possui PhD em engenharia mecânica pela Universidade de Toronto. Para saber mais sobre os serviços de consultoria, teste e treinamento oferecidos pela Veryst, acesse o site veryst.com/mechanical-engineering-services.