

# COMSOL NEWS

A REVISTA DE SIMULAÇÃO MULTIFÍSICA

Criando  
Lanches Perfeitos  
**Universidade Cornell**  
PÁGINA 7

O RONCO  
DAS MOTOCICLETAS  
**MAHINDRA**  
PÁGINA 14



## Transdutores personalizados de alta fidelidade

da Xi Engineering e WAT

PÁGINA 4

# Supere Seus Desafios De Projeto Com Aplicativos De Simulação Personalizados

Dada a complexidade dos produtos atuais e os vários requisitos competitivos que os projetistas devem considerar, elaborar um projeto ideal exige a colaboração de toda a empresa para obter sucesso.

Este foi o principal tema da edição da COMSOL News desse ano equipes de projeto estão desenvolvendo soluções ideais mais rapidamente ao envolver outros departamentos da empresa. Mas como?

Os especialistas em simulação estão desenvolvendo aplicativos de simulação personalizados usando o software COMSOL Multiphysics® e implementando-os com o produto COMSOL Server™. Os engenheiros de produção e vendas têm acesso fácil a resultados de simulações multifísicas de alta fidelidade por meio de bibliotecas de aplicativos desenvolvidas internamente de acordo com suas necessidades específicas. Mesmo não sendo especialistas em modelagem matemática, eles têm acesso a ferramentas computacionais poderosas. Eles podem alterar os parâmetros para afetar a forma e funcionamento. E podem sugerir iterações de projeto baseadas em suas habilidades específicas e no feedback do cliente.

Graças à adoção de aplicativos de simulação em todos os departamentos, o fluxo de trabalho do projeto é simplificado e inclusivo. A modelagem matemática e a simulação numérica podem ser acessadas pelo maior grupo de usuários da história. O conhecimento de toda uma organização é aproveitado na criação de melhores produtos. Aprenda mais sobre transdutores personalizados de alta fidelidade da Xi Engineering e WAT, desenvolvimento de motocicletas na Mahindra Two Wheelers e ciência alimentar na Universidade de Cornell. Junte-se aos usuários do software COMSOL® e inspire-se para desenvolver o melhor projeto da sua vida.

Aproveite!



Valerio Marra  
Marketing Director  
COMSOL, Inc.

## INTERAJA COM A COMUNIDADE COMSOL



COMSOL, Inc.



COMSOL Multiphysics



@COMSOL\_Inc



plus.google.com/+comsol

**BLOG** [br.comsol.com/blogs/](http://br.comsol.com/blogs/)

**FÓRUM** [br.comsol.com/community/forums/](http://br.comsol.com/community/forums/)

Agradecemos os seus comentários sobre a COMSOL News; entre em contato através de [info@br.comsol.com](mailto:info@br.comsol.com)

**COMSOL NEWS**  
2017

© 2017 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server e LiveLink são marcas pelos respectivos proprietários. Consulte a lista dos proprietários de tais marcas no endereço [www.comsol.com/trademarks](http://www.comsol.com/trademarks). Todas as outras marcas registradas são propriedade dos respectivos proprietários, e a COMSOL AB e suas subsidiárias e produtos não são afiliados, endossados, patrocinados ou suportados por esses proprietários de marcas registradas. Para obter uma lista de proprietários acesse [www.comsol.com/trademarks](http://www.comsol.com/trademarks).

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

# ÍNDICE

## TRANSDUTORES DE ALTA PRECISÃO

- 4 | Música Para Seus Ouvidos: Novos Transdutores Para Fones de Ouvido Eletrostáticos



## PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS

- 7 | Criando Lanches Perfeitos

## DISPOSITIVOS ELÉTRICOS

- 11 | Acelerando Projeto de Capacitores Personalizados através de Aplicativos de Simulação

## INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

- 14 | Por Trás do Ronco das Motocicletas Mahindra

## FABRICAÇÃO DE VIDRO PLANO

- 17 | Otimização da Proteção de Tela Durante o Processo de Fabricação

## GERENCIAMENTO TÉRMICO

- 20 | Impulsione as Vendas e Construa Relacionamentos Mais Sólidos Com Aplicativos de Simulação



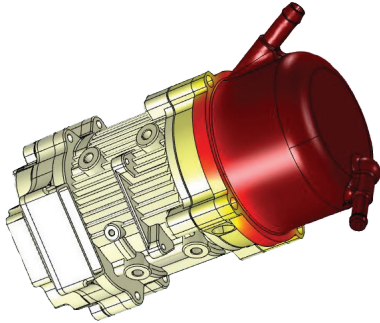
## NA CAPA

Fones de ouvido de altíssimo desempenho HPEL (Laminado Eletrostático de Alta Precisão) e sistema de áudio integrado. Crédito da imagem: Warwick Audio Technologies Ltd.

# REPORTAGENS

## TECNOLOGIA ACÚSTICA NÃO INVASIVA

- 22 | Análise Multifísica Melhora a Detecção de Vazamentos em Adutoras



## SIMULAÇÃO MULTIFÍSICA

- 25 | Impulsionando a Direção Eletrohidráulica Com Protótipos Virtuais

## SISTEMAS DE BATERIA

- 28 | O Quão Rápido as Temperaturas Elevadas Atingem o Interior das Células?

## COMPONENTES AVANÇADOS DE ÁUDIO

- 30 | Na Vanguarda da Pesquisa de Aparelhos Auditivos

## ESPAÇONAVES EM CURTO

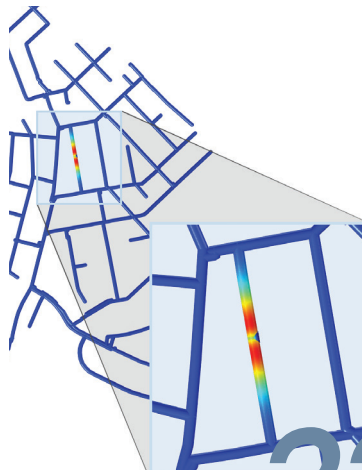
- 33 | Busca por Regiões de Arco Elétrico em Sistemas de Satélites

## EDITORIAL CONVIDADO

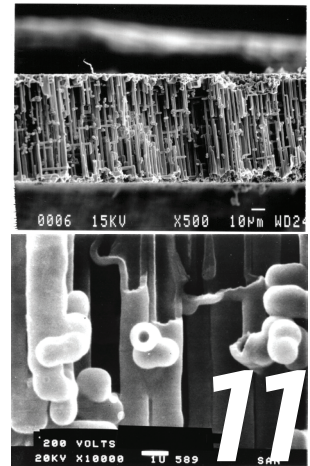
- 36 | A simulação Transforma a Indústria de Equipamentos Médicos



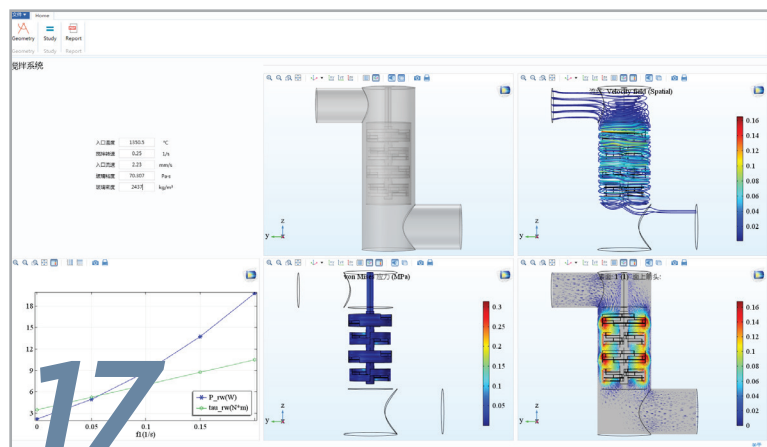
14



22



11



17

# 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 possuía recursos internos de simulação para ajudar a entender esta interação. Para realizar a otimização virtual do projeto do

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

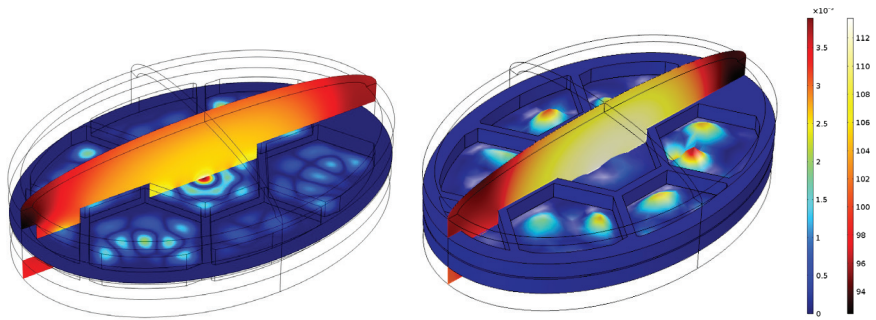
— MARTIN ROBERTS, CEO, WAT



**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.

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



**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.

da Xi Engineering, supervisionou o desenvolvimento dos modelos no software COMSOL Multiphysics® utilizados para analisar o comportamento do transdutor HPEL. O software COMSOL® 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."

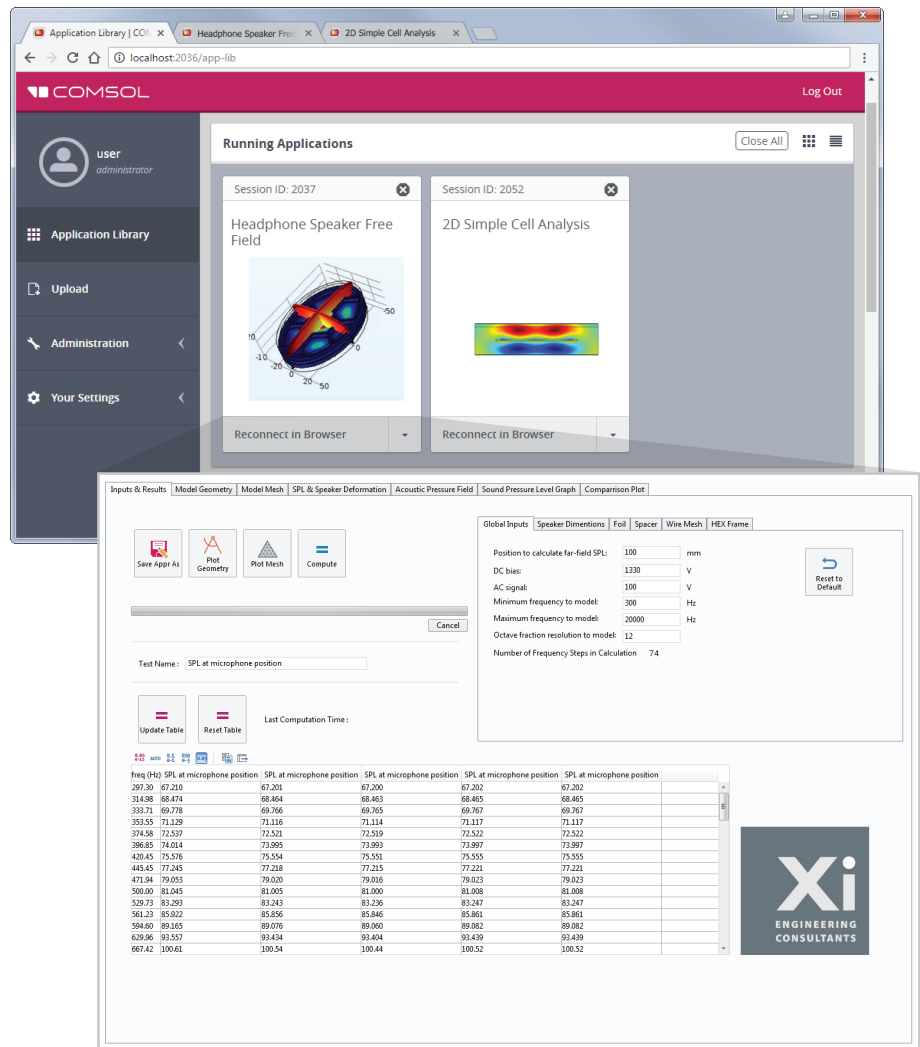
⇒ **LIBERDADE E FLEXIBILIDADE COM UM APLICATIVO DE SIMULAÇÃO**

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.

# CRIANDO LANCHES PERFEITOS

Uma equipe de pesquisa da Cornell fornece modelos matemáticos para o setor alimentício de flocos de arroz.

por **LEXI CARVER**

Grãos tufados são um lanche comum na Ásia há muitos séculos e se tornaram elementos básicos de cereais e petiscos produzidos em massa que estão nas prateleiras de supermercados ao redor do mundo.

A agradável crocância das barras de flocos de arroz caramelizado, dos diversos flocos de milho e das sobremesas de chocolate crocantes é familiar (e deliciosa) para muitos.

Por outro lado, a sensação menos desejável de morder um alimento tufado e descobrir que ele está muito mole, borrachento, seco ou levemente empapado, logo depois de abrir a embalagem também é familiar. O que causa isso?

O que acontece dentro do grão de arroz durante o processo de flocagem, por exemplo? Para um observador casual visualizando o processo, um grão aquece e então muda de modo repentino e explosivo, como uma pipoca (Figura 1).

Entretanto, a física da flocagem envolve uma interação incredivelmente complexa envolvendo transporte de massa, momento e energia, rápida evaporação da água, transição de fase do material, acúmulo de pressão e deformação plástica.

As empresas de alimentos investem várias horas de trabalho para atingir a umidade e textura corretas em alimentos tufados que deixam os clientes satisfeitos. Eles se esforçaram para criar condições

de processamento confiáveis para que os grãos ocasionalmente borrachentos sejam uma anomalia, e não o padrão. Para escalar os métodos de flocagem para produção, as empresas de alimentos devem otimizar o processamento para obter textura, sabor, umidade consistentes e, em alguns casos, segurança alimentar.

## ⇒ PESQUISA DE CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO IDEAIS

Usando uma bolsa de pesquisa do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e do programa de Iniciativa de Pesquisa de Alimentos (AFRI), a Universidade de Cornell conduziu um estudo dos processos de transporte em meio poroso deformável com propriedades dependentes da fase, com foco em alimentos. O Prof. Ashim Datta, do Departamento de Engenharia Biológica e Ambiental, liderou uma equipe para modelar a dinâmica e o comportamento dos materiais durante a flocagem de arroz parbolizado<sup>1</sup>.

Além de estudar os meandros da mudança de fase, transferência de energia e comportamento mecânico durante a flocagem, suas investigações abrangentes observaram os efeitos do pré-condicionamento com sal, temperatura e níveis de umidade iniciais para facilitar a obtenção da textura final desejada.

O cerne da pesquisa foi a necessidade



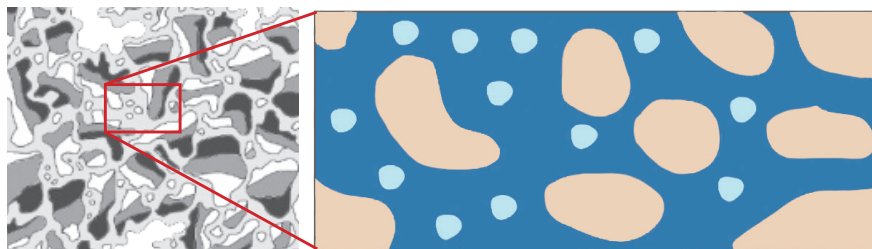
**FIGURA 1.** Arroz parbolizado (acima) e tufado (abaixo).

de determinar uma metodologia de modelagem que pudesse ser transferida para vários cenários. "Construímos uma abordagem para estudar a física do processamento de alimentos e tornamos aplicável a vários problemas: por exemplo, a fritura incorpora um determinado conjunto de fenômenos físicos, enquanto o cozimento envolve um conjunto relativamente diferente dentro da mesma abordagem", explica o Prof. Datta. Ele detalha as preocupações específicas da indústria de alimentos: "Os clientes querem a textura de um alimento frito, mas sem os custos de saúde, ou seja, querem a mesma qualidade, mas não o mesmo método.

"Então, as empresas de alimentos consideraram o cozimento e "estouro" como alternativas à fritura. Os produtos e processos são atualizados constantemente. Quando algo é alterado, é necessário conhecer as novas condições ideais. A abordagem que desenvolvemos nos permite mudar as condições mais facilmente para testar os efeitos de diferentes processos no produto alimentício final.

"Uma vez conhecendo várias combinações de temperatura e umidade para o processamento que levam a determinadas propriedades mecânicas, podemos investigar se outras formas de processamento produzem alimentos da mesma qualidade. Queríamos determinar como diferentes processos afetam a textura, teor de água ou óleo e até mesmo as implicações de saúde correspondentes."

Um dos maiores desafios que a equipe



**FIGURA 2.** Ilustração do arroz como um sólido poroso e elasto-plástico. Os grãos contêm água líquida sujeita a difusão capilar, convecção e mudança de fase (azul escuro), gás composto de vapor de água e ar, sujeito a grande fluidez, difusão binária e mudança de fase (azul claro) e um esqueleto de amido sólido que passa por grandes deformações (bege).

de projeto enfrentou foi o fato de tantos fatores influenciarem o estado final do alimento. Aquecer grãos de arroz parbolizado a temperaturas de 200°C leva à rápida evaporação da água líquida, resultando num grande acúmulo de pressão e transformação de fase nos grãos. Os grãos passam rapidamente de um estado rígido e vítreo para um estado macio (borrachento) que permite que os grãos inchem até o formato final. O tempo de aquecimento e os teores de água e sal iniciais também têm um papel decisivo.

⇒ **MODELAGEM DE FÍSICAS INTERCONECTADAS**

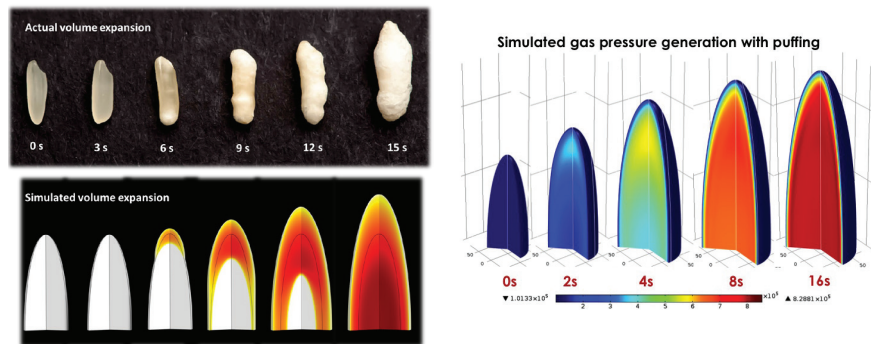
Para entender como estes fatores trabalham juntos e aperfeiçoar as condições de processamento ideais, Tushar Gulati, que no momento era aluno do Prof. Datta, liderou os trabalhos para desvendar os mistérios da flocagem de arroz. Ele usou o software COMSOL Multiphysics® para analisar os comportamentos mecânico, térmico, material e fluido interconectados em um grão de arroz parbolizado durante a flocagem.

"Numericamente, este é um problema bastante desafiador", comentou o Prof. Datta. "A equipe estudou escoamento em meios porosos, transporte multifásico, mecânica dos sólidos e transferência de calor e em outras situações incorporou o comportamento eletromagnético envolvido no aquecimento por micro-ondas."

Gulati criou um modelo de meio poroso para estudar as alterações de massa e momento, transporte de energia e grande expansão volumétrica. O modelo considerou as várias fases do arroz sólido, água e vapor d'água e os modos de transporte de umidade, tais como escoamento capilar, difusão binária e escoamento por pressão. Assumiu-se que o arroz é um material elasto-plástico e obteve-se o deslocamento mecânico e a expansão.

**“Aplicativos de simulação abrem novas oportunidades de ensino. Numa aula de segurança alimentar, os aplicativos permitem conduzir aprendizagem multidisciplinar, na qual os alunos podem simular vários possíveis cenários de forma realista.”**

— **PROF. ASHIM K. DATTA, UNIVERSIDADE DE CORNELL**



**FIGURA 3.** Esquerda: Expansão volumétrica medida e expansão volumétrica simulada durante uma sequência de flocagem de 15 segundos. Direita: Simulação mostrando o aumento de pressão gasosa.

A simulação correspondente revelou as distribuições espaciais e temporais de temperatura, umidade, pressão, taxas de evaporação, deformação volumétrica, porosidade e níveis de tensão em vários momentos durante o processo de flocagem (Figuras 3 e 4).

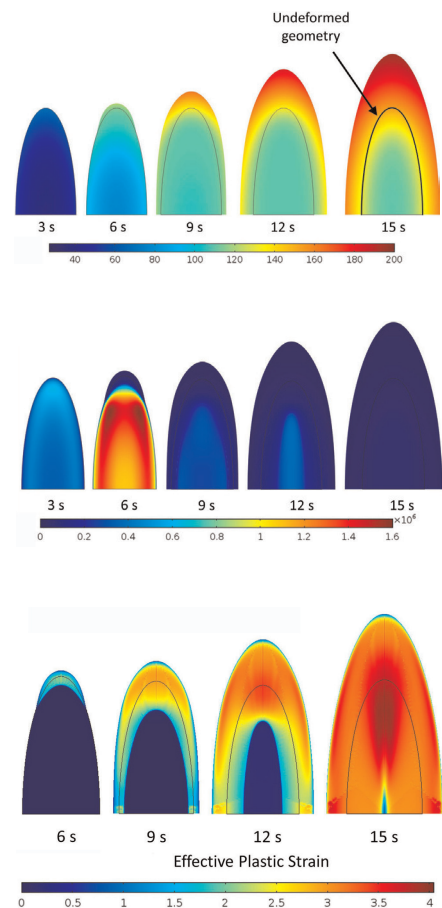
A equipe validou o modelo computacional usando uma reconstrução de micro imagens de TC usadas para determinar a razão de expansão e visualizar o desenvolvimento da microestrutura. Gulati também descobriu que a razão de expansão era sensível às taxas de evaporação e à permeabilidade intrínseca da matriz sólida modelada.

Ao final do trabalho, eles obtiveram um modelo totalmente acoplado que conectava os diferentes comportamentos que ocorrem durante a flocagem, incluindo mudanças de fase. Gulati acoplou o modelo de transporte ao de grandes deformações, e também testou como vários níveis de sal afetam a expansão volumétrica, evaporação e propriedades do material.

O sal abaixa a temperatura de transição vítrea, significando que os flocos de arroz se formam mais rapidamente e em temperaturas mais baixas.

"A simulação ilustrou como as propriedades variam dentro do grão de arroz inicialmente, e também como elas

mudam com o passar do tempo durante o aquecimento", acrescentou o Prof. Datta. "Isso seria impossível de medir experimentalmente. O modelo diz como o



**FIGURA 4.** Temperatura (superior, em graus Celsius); Primeira tensão de tração principal (centro, em Pa); e deformação plástica efetiva durante a flocagem (inferior).



grão de arroz se expande, seca e encolhe."

O modelo também permite entender como a porosidade se desenvolve, ilustrando a formação dos poros iniciando na ponta do grão e progredindo para dentro (Figura 5).

Com base nos resultados, eles determinaram a quantidade ideal de sal, umidade, temperatura e tempo de aquecimento para produzir o floco de arroz ideal. A simulação também mostrou as condições necessárias para maximizar a razão de expansão.

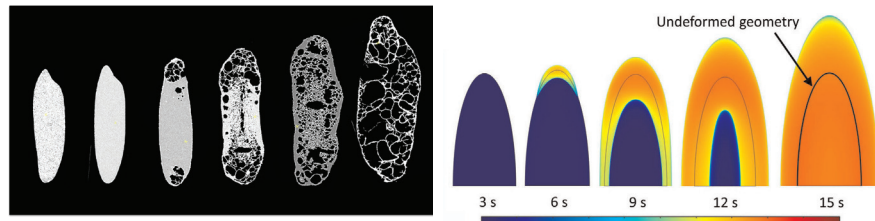


FIGURA 5. Esquerda: Tomografia computadorizada do arroz em diferentes momentos durante a flocagem. Direita: Simulação mostrando os perfis de porosidade previstos.

## ⇒ O FUTURO DA ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Além desse modelo, a equipe de pesquisa do Prof. Datta expandiu suas práticas de simulação para estudos de segurança alimentar. Este assunto afeta significativamente as empresas de alimentos, que precisam prever os benefícios para a saúde de determinados alimentos, conhecer a data de vencimento e garantir que seus processos são seguros.

O Prof. Datta é, atualmente, PI de um projeto USDA financiado pela NIFA, no qual os alunos usam o software COMSOL para não somente criar simulações, mas também para desenvolver aplicativos computacionais para permitir que pessoas sem formação em engenharia façam tais análises. Na Universidade de Cornell, os aplicativos são implementados em larga escala usando o COMSOL Server™. Os aplicativos são benéficos para os alunos e professores, pois não é necessário investir diretamente no hardware ou software.

"Aplicativos de simulação abrem novas oportunidades de ensino", ele comenta. "Numa aula de segurança alimentar, os aplicativos permitem conduzir aprendizagem multidisciplinar, na qual os alunos podem simular vários possíveis cenários de forma realista." O aplicativo desenvolvido na Cornell é usado por várias universidades por todos os Estados Unidos.

Eles forneceram aos cientistas de alimentos um aplicativo que trata de comida enlatada, para analisar como o tempo de aquecimento necessário para esterilização varia com os tamanhos das latas (figura 6). O usuário do aplicativo pode ajustar a temperatura e calcular quanto tempo demora para aquecer o alimento até uma temperatura segura para uma determinada lata. Ele também fornece uma taxa ajustada de morte de bactérias, para confirmar se o produto final é seguro para consumo ou não.

O Prof. Datta disse que, apesar do floco de arroz ter sido o ponto inicial, seu trabalho pode ser facilmente transferido

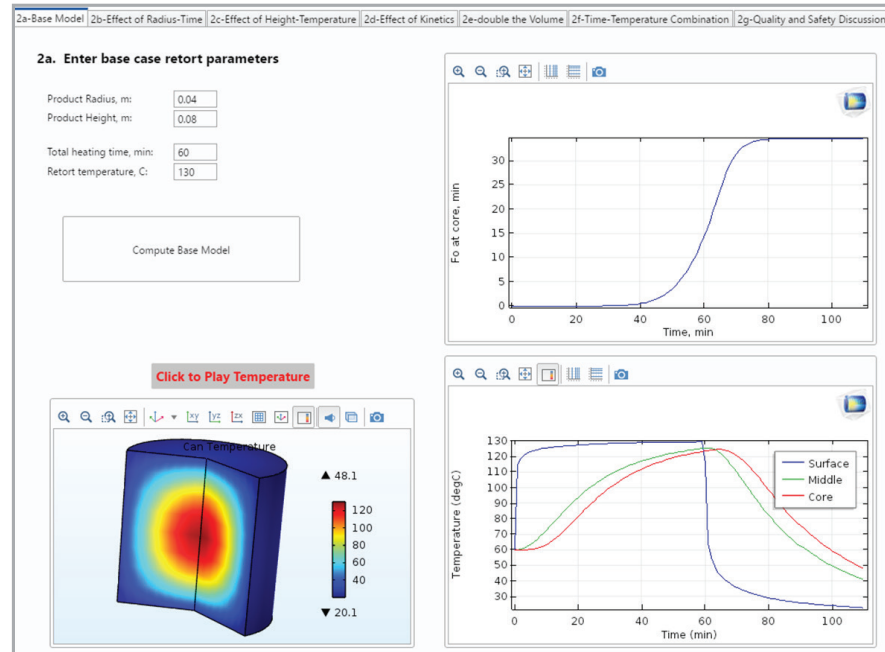


FIGURA 6. Aplicativo computacional criado pelos alunos do Prof. Datta para estudar alimentos enlatados. Os usuários podem alterar parâmetros como as dimensões da lata e tempo de aquecimento.

para outros biomateriais, como o milho — ou até mesmo para outras aplicações totalmente diferentes. "O conhecimento de física e modelagem é útil em outras indústrias", ele afirma. "Por exemplo, um dos meus alunos estudou posteriormente a secagem por micro-ondas dos moldes de conversores catalíticos de automóveis, usando técnicas de simulação semelhantes às desenvolvidas aqui." Enquanto ensina os fundamentos da modelagem física para a próxima geração de engenheiros, ele aguarda ansiosamente para ver qual será o futuro da indústria alimentar. ❖

## REFERÊNCIAS

1. Gulati, Tushar and Datta, Ashim K. "Coupled multiphase transport, large deformation and phase transition during rice puffing," *Chemical Engineering Science* 139 (2016) 75–98.



Uma das partes favoritas do trabalho do Prof. Datta é lecionar um curso na Universidade de Cornell que apresenta aos alunos o uso do software COMSOL para modelagem de processo biomédicos. Devido à capacidade do software em acoplar totalmente

fenômenos multifísicos integrados, tais como os presentes na flocagem de arroz, ele acredita que o software COMSOL é uma ferramenta poderosa para que os alunos aprendam sobre simulação e a física subjacente em várias aplicações de ciência biomédica.

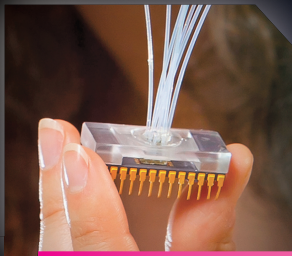
Neste ano, o Prof. Datta também ministrará um workshop na International School on Modeling and Simulation (Escola Internacional de Modelagem e Simulação), uma escola internacional de curto prazo que é o resultado de um grupo de interesse específico de virtualização na engenharia de alimentos.

Connect on social media:  
#CTF2017

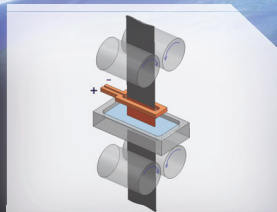


# CAN YOU DESIGN A BETTER TOMORROW?

THEY DID.



Life-Saving Bacterial Detection



High Performance Armor



Oil Change Transformation



Grab-and-Go Booster Seat

NOW IT'S YOUR TIME TO SHINE!  
ENTER TO WIN \$20,000 GRAND PRIZE  
[createthefuturecontest.com](http://createthefuturecontest.com)

Create  
THE  
Future

DESIGN CONTEST 2017

PRINCIPAL SPONSORS



# ACELERANDO PROJETO DE CAPACITORES PERSONALIZADOS ATRAVÉS DE APLICATIVOS DE SIMULAÇÃO

Os engenheiros da Cornell Dubilier Electronics usam aplicativos de simulação para avaliar e otimizar projetos de capacitores personalizados. Estes aplicativos permitem que os engenheiros de projeto e produção explorem rapidamente diversas configurações no local, evitando a complexidade do modelo computacional subjacente.

por **SARAH FIELDS**

Os capacitores estão presentes na maioria dos dispositivos elétricos comuns utilizados hoje em dia, assim como em aplicações que exigem a consideração de condições extremas. Os requisitos de cada uma das aplicações que exigem o uso de capacitores podem variar significativamente. Um capacitor pode exigir uma especificação de potência exata, pode precisar funcionar dentro de uma determinada faixa de temperatura ou pode ser feito de materiais específicos.

A Cornell Dubilier Electronics, um dos maiores fabricantes de capacitores personalizados usados ao redor do mundo, desenvolve capacitores para algumas das aplicações militares e aeroespaciais mais exigentes, incluindo caças e sistemas de radar, assim como para aplicações civis como turbinas eólicas e energia solar. Os engenheiros da Cornell Dubilier usam modelagem matemática e aplicativos de simulação específicos para fazer o ajuste fino no projeto de capacitores personalizados.

"O software COMSOL Multiphysics e seu Application Builder me permitem criar modelos multifísicos de alta fidelidade e desenvolver aplicativos baseados neles, o que permite a meus colegas em outros



**FIGURA 1.** Capacitores eletrolíticos de alumínio. Os enrolamentos são compostos por folhas de alumínio e separadores de celulose, e exibem anisotropia térmica.

departamentos testarem configurações diferentes e escolherem o melhor projeto", comenta Sam Parler, Diretor de Pesquisa da Cornell Dubilier.

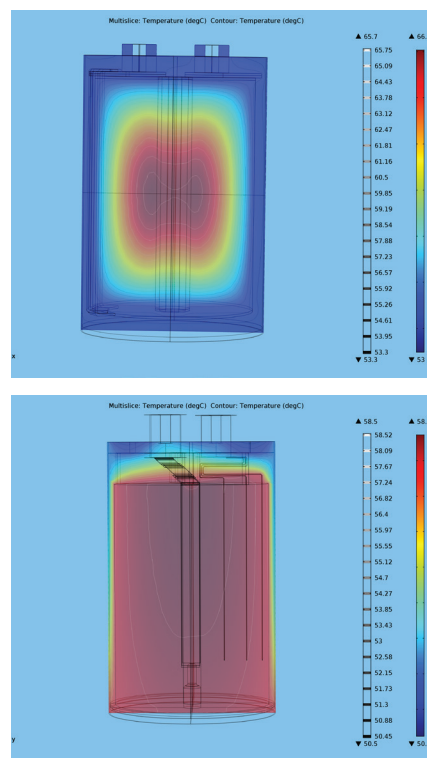
## ⇒ QUANDO AS COISAS ESQUENTAM

Os capacitores da Cornell Dubilier são específicos para as aplicações para os quais são projetados, e podem ser compostos por um ou mais elementos, tais como enrolamentos eletrolíticos compostos por folhas de alumínio e separadores de celulose; enrolamentos eletrostáticos de compensação, películas dielétricas metalizadas; ou placas de folhas metálicas intercaladas com materiais dielétricos, como mica (Figura 1).

Uma das principais questões consideradas pelos projetistas de capacitores é o calor. A corrente que passa pelas folhas de alumínio dos enrolamentos gera calor por efeito Joule, que deve ser levado em consideração durante o projeto para entender totalmente o perfil térmico dentro do capacitor. O calor excessivo encurta dramaticamente a vida do capacitor, que é reduzida ao meio sempre que a temperatura do capacitor fica de 6 a 10 graus mais alta que o máximo. Os engenheiros da Cornell Dubilier usam a simulação para minimizar a geração e otimizar a dissipação de calor.

Para otimizar a geração e dissipação de calor, os materiais complexos do capacitor devem ser representados precisamente. Um capacitor pode ser composto facilmente por até 6 materiais diferentes, alguns deles com propriedades anisotrópicas. Num único projeto, o enrolamento é composto por separadores de celulose e folhas de alumínio, e exibe anisotropia térmica da condutividade térmica duas ordens de grandeza maior na direção axial do que na direção radial.

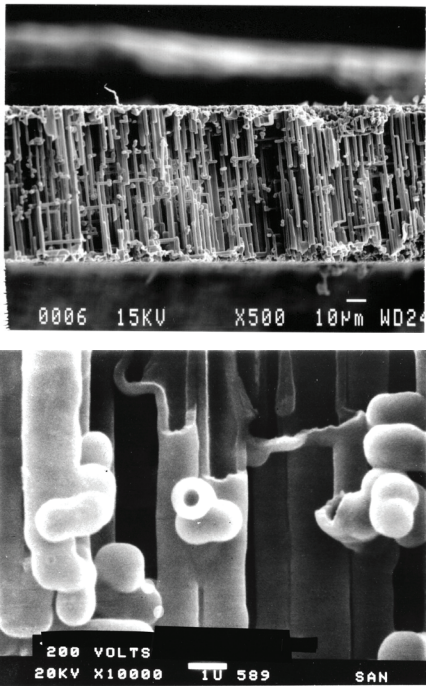
Parler é capaz de capturar precisamente o perfil térmico dos capacitores com o COMSOL Multiphysics® graças à



**FIGURA 2.** Uma comparação térmica entre um capacitor de película de polipropileno metalizada (acima) e um capacitor eletrolítico de alumínio (inferior), ambos de aproximadamente 76 x 120mm e com dissipação de 5 Watts em ambiente de 45°C.

flexibilidade que permite inserir diretamente o tensor de condutividade térmica. Por exemplo, um tensor de capacitor simples, de com um enrolamento eletrolítico cilíndrico com orientação em z, pode ser aproximado como ortotrópico com um tensor de condutividade térmica diagonal de  $\{1,1,100\}$  [W/m/K].

Em um caso, Parler considerou 2 capacitores com potência e oscilação de corrente semelhantes, mas com construção



**FIGURA 3.** Microestrutura coaxial de capacitores eletrolíticos de alumínio grandes. O dielétrico é óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), produzido num banho anodizante sobre a superfície tortuosa da folha de alumínio altamente marcada. Nas imagens exibidas, o alumínio ao redor dos tubos dielétricos de alumina foi dissolvido.

totalmente diferente: um capacitor de película de polipropileno (plástico) metalizada e um capacitor eletrolítico de alumínio (Figuras 1 e 2).

O capacitor de película plástica (topo) tem condutividade térmica axial muito inferior à do capacitor eletrolítico de alumínio (inferior). Usando simulação multifísica, Parler foi capaz de quantificar a diferença de temperatura entre o capacitor de película plástica e o capacitor eletrolítico de alumínio para uma determinada tensão dissipada.

### ⇒ DESMISTIFICAÇÃO DA MICROESTRUTURA COM OTIMIZAÇÃO DE FORMATO

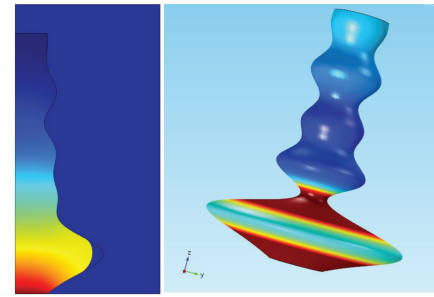
Como os capacitores desenvolvidos pela Cornell Dubilier normalmente são novos avanços tecnológicos, em alguns casos, é necessário caracterizar a impedância de materiais de ponta dentro da empresa.

Para projetar um capacitor eletrolítico de alumínio grande, Parler precisava representar a impedância de um material dielétrico de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com microestrutura complexa. Este

material dielétrico foi produzido num banho anodizante sobre a superfície tortuosa da folha de alumínio altamente marcada (Figura 3).

Apesar da simulação de circuito elétrico zero dimensional realizada em um software diferente ter sido capaz de reproduzir as respostas em frequência, ela não foi capaz de realizar a simulação transitória devido a erros de não causalidade que surgiram da limitação dos algoritmos internos da transformada inversa de Laplace.

Usando uma técnica de otimização de forma com o software COMSOL, Parler foi capaz de calcular a solução transitória correta para o cliente. Ele começou com um único poro capacitivo cilíndrico cheio de eletrólito, aplicou uma excitação conhecida na abertura e usou o solver de otimização não linear (SNOPT) disponível no software para encontrar a solução do seu problema de otimização não-linear, no qual o formato da parede assimétrica do poro teve



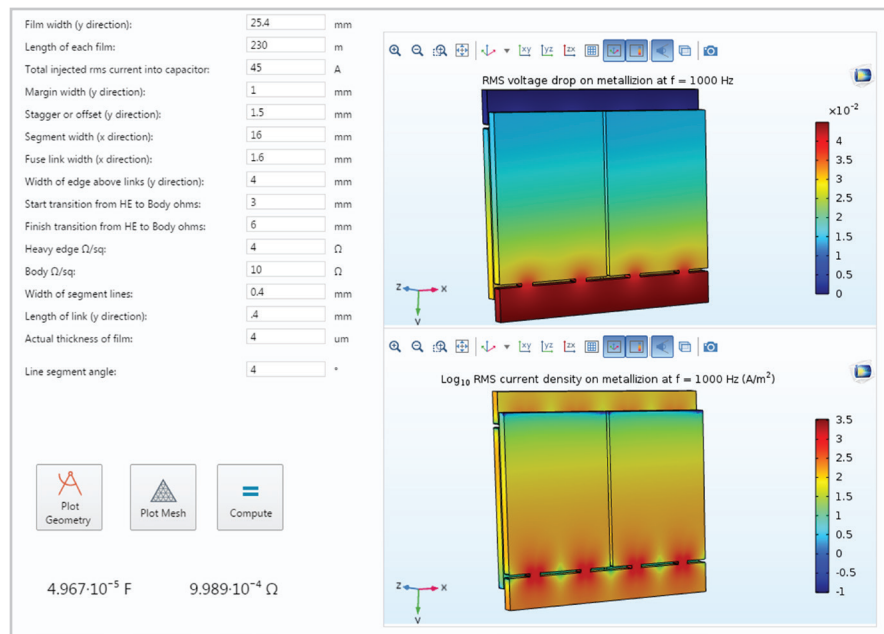
**FIGURA 4.** Uma abordagem alternativa para capturar o comportamento elétrico da microestrutura coaxial do material dielétrico é usar técnicas de otimização de formato. A figura exibe a microestrutura otimizada.

que ser variada até se ajustar aos dados experimentais de impedância.

A geometria resultante (Figura 4) demonstrou que o software poderia reproduzir precisamente a resposta de pulso de corrente dependente do tempo

“Usando o COMSOL Multiphysics® e seu Application Builder, eu consigo criar modelos multifísicos de alta fidelidade e desenvolver aplicativos baseados neles, o que permite que meus colegas em outros departamentos testem configurações diferentes e escolham o melhor projeto.”

— SAM PARLER, DIRETOR DE PESQUISA, CORNELL DUBILIER



**FIGURA 5.** Um aplicativo de projeto de capacitor de película, usado para determinar a capacitância e a resistência.

que foi medida experimentalmente, permitindo aperfeiçoar o projeto com base num modelo matemático validado.

## UMA FAMÍLIA DE APLICATIVOS PARA OTIMIZAÇÃO ELÉTRICA

Depois de usar o COMSOL para criar modelos para analisar seus projetos, Parler e sua equipe converteram os modelos em aplicativos de simulação prontos para serem disponibilizados aos engenheiros de projeto e às unidades de produção, para auxiliar no projeto.

Usando um aplicativo de simulação de capacitor de potência de película, o engenheiro de projeto é capaz de inserir a largura da película (normalmente, alguns centímetros), o comprimento da película, as resistências superficiais e a localização da região de transição na interface para determinar a capacitância e resistência de um segmento de filme metalizado. O resultado é escalado para fornecer a capacitância e resistência para todo o enrolamento, oferecendo aos engenheiros uma validação inicial de seu projeto.

Outro aplicativo calcula a densidade de potência do filme metalizado num capacitor cilíndrico. Ele também prevê a distribuição de temperatura no núcleo, incluindo as abas e terminais, levando em conta as condições operacionais do cliente, tais como oscilação de corrente, temperatura ambiente e velocidade do ar (Figura 6).

Um terceiro aplicativo é usado para calcular a indutância em série efetiva (ESL) de um capacitor de película de aba simples (Figura 7). O usuário do aplicativo é capaz de modificar parâmetros geométricos, tais como diâmetro, altura e espaçamento do terminal, largura da aba, diâmetro do enrolamento e diâmetro externo do núcleo. O modelo subjacente usa um estudo no domínio da frequência e os recursos de modelagem eletromagnética do COMSOL. A ESL um aspecto chave de projeto de qualquer capacitor, e está diretamente ligada ao desempenho do capacitor.

## OS APLICATIVOS GUIAM O FUTURO DA PRODUÇÃO

Com a simulação multifísica, a equipe de Parler é capaz de prever precisamente o desempenho dos seus projetos de capacitor, acelerando o desenvolvimento e garantindo a confiabilidade de seus produtos.

Os aplicativos de simulação, baseados nos modelos COMSOL subjacentes, permitem que outros membros da equipe de projeto e engenheiros da unidade de produção ajustem parâmetros importantes da simulação, por meio de uma interface simplificada, para

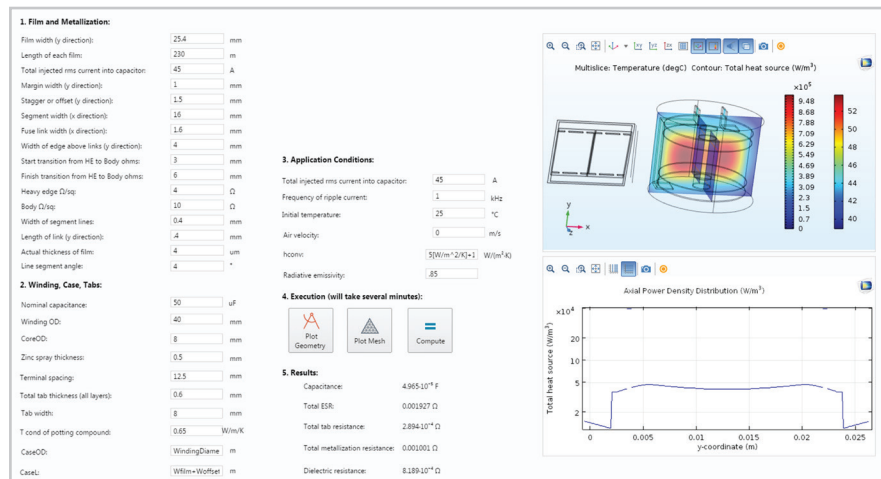


FIGURA 6. Aplicativo de simulação que prevê a distribuição de temperatura do núcleo e a densidade de potência da película de um capacitor cilíndrico com abas e terminais.

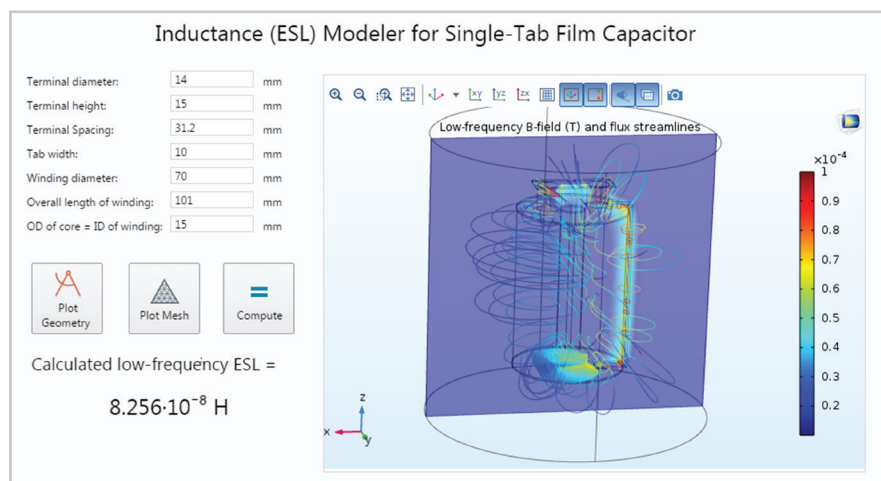
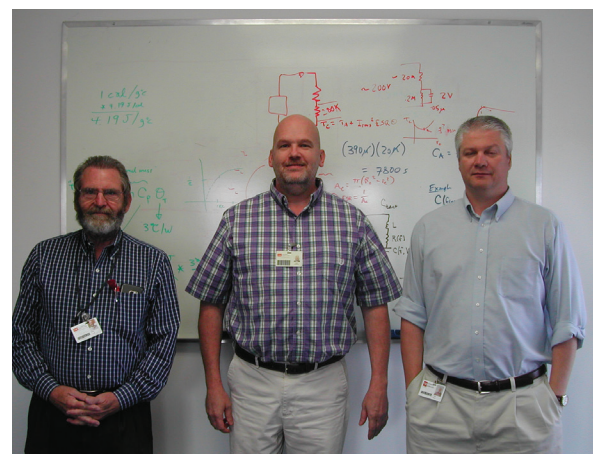


FIGURA 7. Aplicativo usado para calcular a indutância em série efetiva (ESL) de um capacitor de película de aba simples.

testar o desempenho dos capacitores e mostrar os efeitos dos ajustes no projeto. Isso dissemina o poder da simulação por todas as etapas de projeto e produção.

Parler conclui que "A capacidade de criar modelos multifísicos e aplicativos de simulação simplificou o projeto e acelerou o desenvolvimento de capacitores personalizados para clientes do mundo inteiro." ❖



Da esquerda para a direita: David Leigh, cientista da equipe, Sam Parler, Diretor de Pesquisa, e Trent Bates, engenheiro de capacitores da Cornell Dubilier.



## 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.

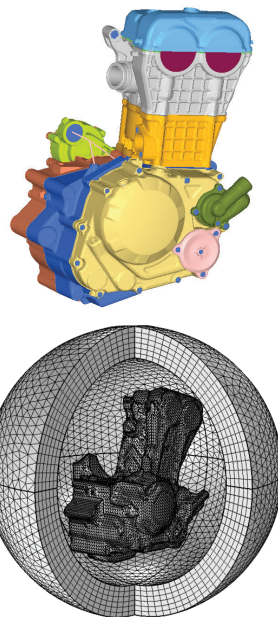
por **VALERIO MARRA**

**A** Mahindra Two Wheelers produz uma ampla gama de motonetas e motocicletas para o mercado indiano. Graças à adoção de ferramentas de simulação numérica no início do ciclo de desenvolvimento, os pilotos e passageiros desfrutam 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.

### ⇒ OBTENÇÃO DOS NÍVEIS DE RUÍDO IDEAIS

Um motor tem várias fontes de ruído, incluindo os processos de admissão e combustão, pistões, engrenagens, comando de válvulas e sistema de exaustão. O ruído de combustão se deve às vibrações estruturais causadas pelo rápido aumento de pressão dentro dos cilindros. Estas vibrações continuam da transmissão, para a



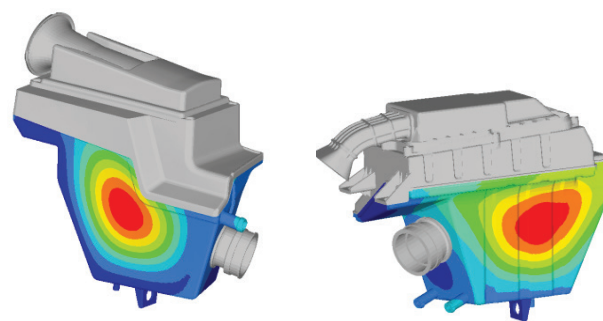
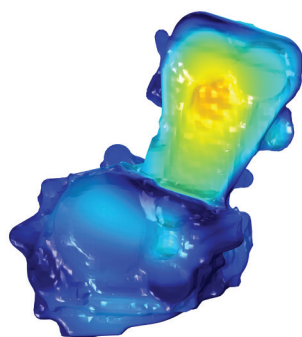
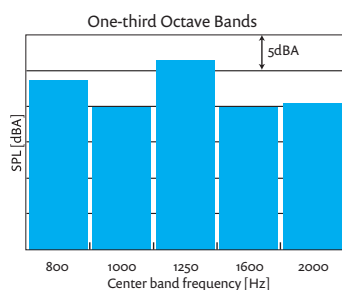
**FIGURA 1.** Topo: geometria CAD do motor. Inferior: malha 3D do modelo, contido numa camada perfeitamente casada (PML).

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 cercado por uma camada perfeitamente casada (PML).

A PML amortece as ondas



**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).

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

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 2000 Hz, 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 espessura da parede e fortalecimento do local de instalação (Figura 2). Ajustando estes parâmetros, o SPL foi reduzido na faixa de frequência 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 3 parâmetros: perda de transmissão, perda de inserção e níveis de ruído irradiados. O parâmetro mais importante é a perda de transmissão, determinada exclusivamente pelo

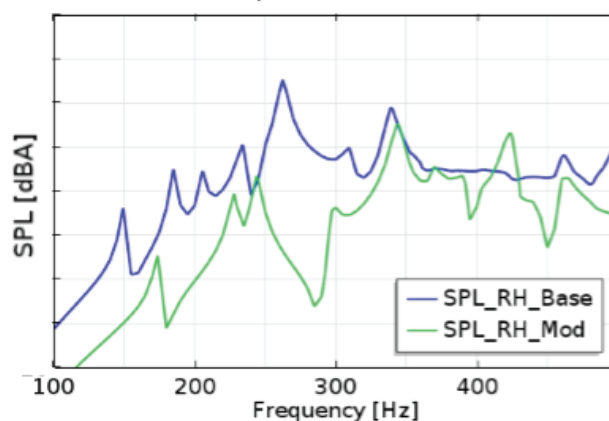
projeto do silenciador e é independente da fonte de pressão. O desafio da equipe da Mahindra era prever a perda de transmissão do silenciador da motocicleta e em seguida otimizar a perda conforme os níveis desejados para uma determinada faixa de frequência.

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.

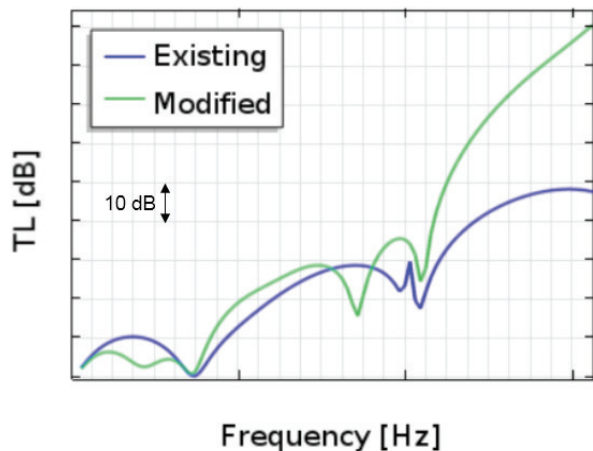
As perfurações nos tubos foram definidas usando os detalhes de porosidade da área perfurada, usando um

modelo de impedância de transferência predefinido. As entradas necessárias para realizar a análise foram a porosidade da área, espessura do defletor 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 do silenciador. Com o silenciador modificado, a equipe atingiu a reduzida perda de transmissão desejada



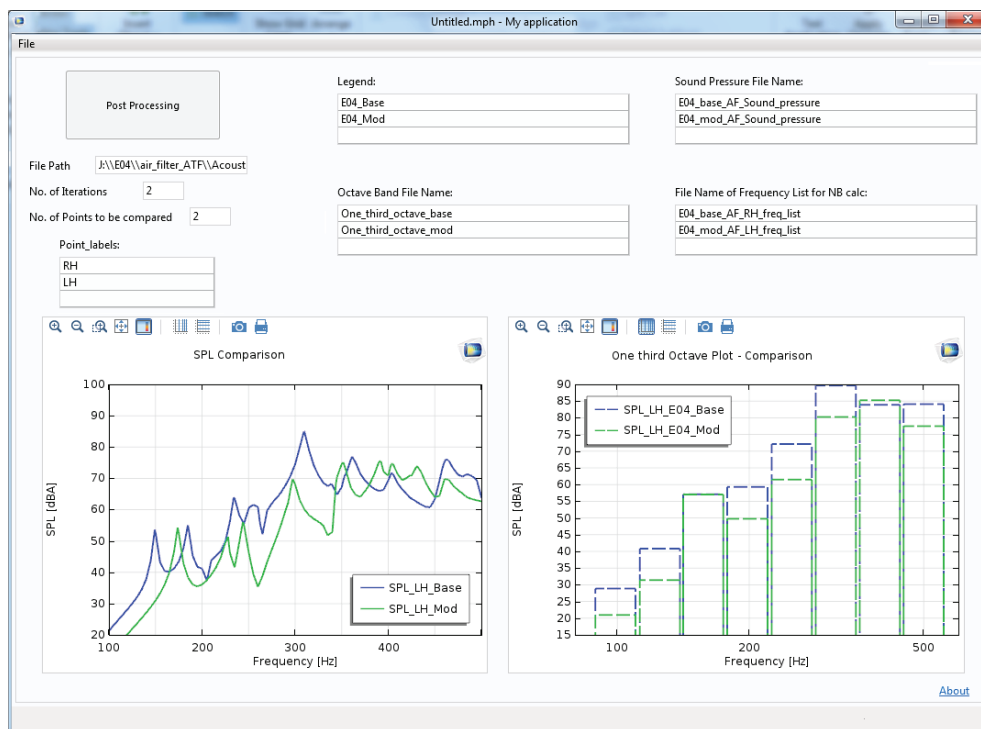
**FIGURA 4.** Os resultados da simulação mostram uma redução do ruído estrutural no projeto do filtro de ar modificado.



**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.

**“Criamos um aplicativo de simulação usando o gerador de aplicativos para comparar os arquivos de resApplication Builder para traçar o gráfico dos dados de SPL, o que economizou bastante tempo.”**

— ULHAS MOHITE, GERENTE DE P&D, 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).

nas baixas frequências (Figura 5). Como um resultado, o desejado efeito do incremento 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 o 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 gerador de aplicativos 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", conclui 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. (<http://papers.sae.org/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/>



# Otimização da proteção de tela durante o processo de fabricação

A Kornerstone Materials Technology (KMTC) otimiza os processos de fabricação de vidro utilizando tecnologia de simulação multifísica, promovendo a colaboração entre departamentos da empresa por meio de aplicativos de simulação.

por **VALERIO MARRA & LEXI CARVER**

Hoje em dia, os smartphones e tablets se tornaram partes inseparáveis de nosso trabalho, aprendizado, lazer e entretenimento diários. A tela de um dispositivo móvel tem uma camada superior protetora, conhecida como vidro de proteção. O vidro de proteção é usado principalmente para proteger a tela, oferecendo alta transmitância de luz visível e uma aparência elegante.

O vidro de proteção é um produto de alta qualidade, com preço dezenas ou até centenas de vezes maior que o vidro comum. O alto preço se deve ao processo de fabricação extremamente desafiador. As coisas ficam mais complicadas devido aos comportamentos diferentes que o vidro de proteção exibe sob diferentes condições. Estas particularidades exigem desempenho do mais alto calibre dos departamentos de produto e desenvolvimento da empresa.

A Kornerstone Materials Technology Co., Ltd. (KMTC) se especializa em Displays, componentes para telas sensíveis ao toque e desenvolvimento e produção de materiais de alta tecnologia (Figura 1). "Nossos produtos focam no vidro de proteção usado em dispositivos eletrônicos como smartphones e tablets," explica Frank Hong, Gerente de P&D da KMTC. "Para atender às necessidades cada vez mais diversas de nossos clientes e para lidar com a oportunidade e os desafios da indústria de telas sensíveis ao toque, a KMTC está usando as vantagens da simulação multifísica para avaliar e otimizar o processo de fabricação de vidro."

## ⇒ MULTIFÍSICA NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE VIDRO

A indústria de produção de displays de vidro é dominada por 3 principais processos de fabricação: float glass, slot down-draw e overflow down-draw. Destes

3 processos, o overflow down-draw é a técnica mais utilizada. Neste processo, uma lâmina de vidro ultrafina é formada naturalmente no ar conforme 2 regiões de vidro fundido se unem (Figura 2, esquerda). O vidro produzido tem superfícies planas e áreas de corte isentas de poeira. Não é necessário lixar ou polir a superfície para corrigir diferenças de característica.

Como pioneira na produção de vidro de proteção com alto teor de alumina, a KMTC aperfeiçoou a aplicação da tecnologia de derramamento e se tornou a líder a nível doméstico. "Nosso processo único é capaz de produzir o vidro sem quaisquer marcas ou danos na superfície durante o processo de formação", diz Hong. "A superfície do substrato de vidro formada é suave, pura e impecável, atendendo às demandas do mercado de aparelhos eletrônicos".

Durante o processo overflow down-draw, o vidro fundido, altamente viscoso e homogêneo, flui do forno de fusão por um canal de platina e em seguida por um bloco de formação feito de materiais refratários (Figura 2, esquerda). O vidro fundido desce pelos dois lados do bloco sob influência da gravidade (Figura 2, direita). As regiões do vidro se unem novamente na parte inferior do bloco e continuam a descer, guiadas

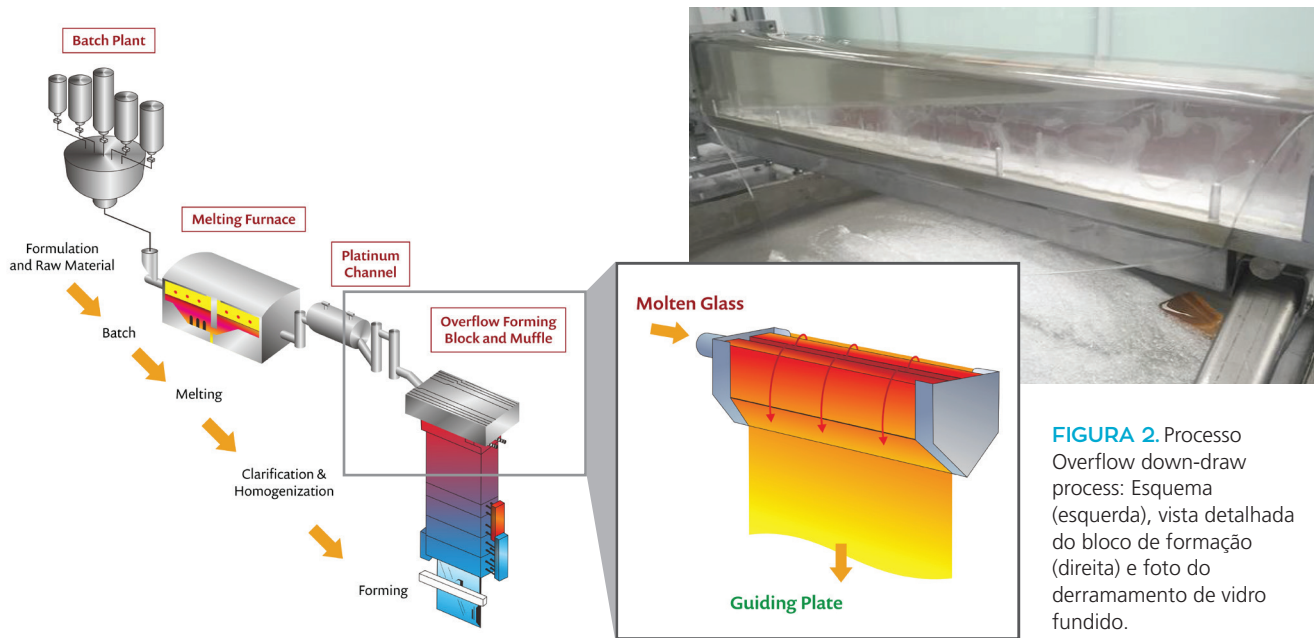
por uma placa, e resfriam ao ar para formar uma lâmina de vidro ultrafina. A espessura da folha é controlada pelo fluxo de entrada e placas guias, que também determinam a saída de vidro. A temperatura é monitorada de perto, pois afeta a viscosidade do vidro e a velocidade do escoamento, e deve ser controlada cuidadosamente para evitar empenamento. O processo completo de fabricação de vidro é um problema multifísico envolvendo acoplamento fluido-sólido-térmico-elétrico.

Os engenheiros da KMTC usam modelos multifísicos para avaliar a eficiência do aquecimento elétrico dos sistemas de fusão de vidro. Eles também usam aplicativos criados a partir destes modelos para simular os processos de fabricação em tempo real. Os dados resultantes são usados como diretrizes nos processos de fabricação adotados pelo departamento de produção.

Os modelos, criados no software COMSOL Multiphysics®, incluem os fenômenos de escoamento, estruturais, térmicos e elétrico acoplados. A equipe faz simulação de escoamento e transferência de calor do vidro fundido para calcular a distribuição de espessuras na superfície de saída do vidro antes do resfriamento e deformações geradas durante o processo



**FIGURA 1.** Vidro de proteção 3D permite que os engenheiros desenvolvam visores melhores para smartphones e tablets.



**FIGURA 2.** Processo Overflow down-draw process: Esquema (esquerda), vista detalhada do bloco de formação (direita) e foto do derramamento de vidro fundido.

de formação (Figura 3). "O software nos permite colocar equações constitutivas ou variar parâmetros, como velocidade de admissão ou ângulo de inclinação do bloco de formação, e também otimizar as condições do processo antes da produção em massa", explica Hong.

Os resultados da simulação multifísica são usados para prever a qualidade da lâmina de vidro, com base em fatores como espessura, uniformidade, suavidade e defeitos da lâmina final, além de otimizar as condições do dispositivo e do processo. "O COMSOL nos permitiu resolver problemas multifísicos com o nível de personalização necessário", diz Hong.

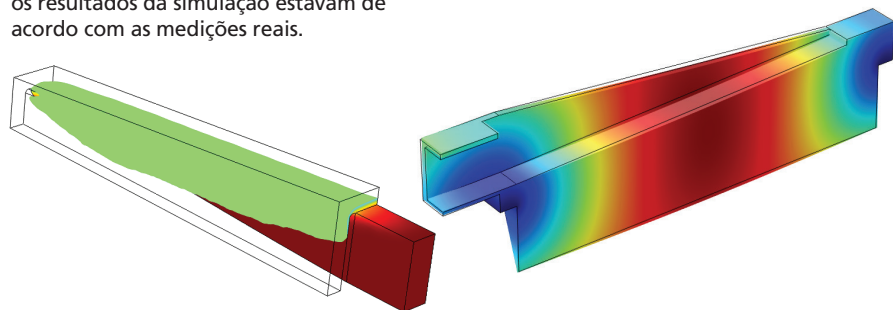
### ⇒ SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO ELÉTRICO

Quando o vidro fundido entra em contato com os materiais refratários do bloco de formação, sua composição muda e passa a incluir o ar, que pode introduzir bolhas e alterar o peso final da lâmina de vidro. A presença do canal de platina compensa esta situação permitindo o condicionamento prévio, tal como ajuste de refinamento, homogeneização, agitação e temperatura antes do vidro entrar no bloco de formação. Cada seção do canal é capaz de fornecer vidro fundido a diferentes viscosidades, graças ao controle de temperatura em tempo real do tubo de aquecimento elétrico usando tensão CA controlada.

Há dois tipos de estruturas de tubo de aquecimento CA no canal — um tubo reto

com parede de espessura não uniforme e um tubo em Z com parede de espessura uniforme (Figura 4). "Usando o software COMSOL Multiphysics, fomos capazes de avaliar a distribuição de densidade de corrente nas paredes do tubo e os efeitos de aquecimento das duas estruturas", diz Hong.

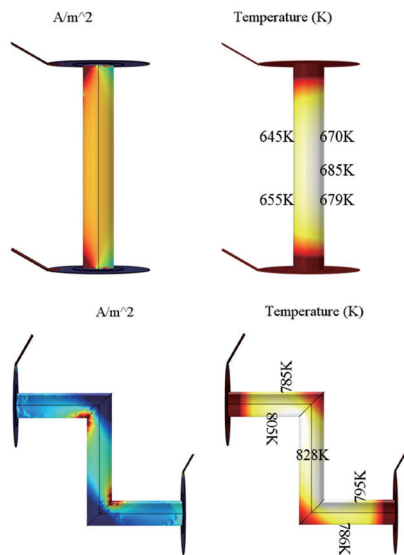
O modelo multifísico inclui aquecimento Joule por meio do acoplamento de correntes elétricas e transferência de calor. As equações governantes são discretizadas pelo método dos elementos finitos e resolvidas usando um estudo estacionário no domínio da frequência. Os resultados computados incluem as distribuições de efeitos do aquecimento CA e a densidade de corrente superficial, conforme mostrado na Figura 4. Os resultados mostraram à equipe de Hong as diferenças de aquecimento entre os dois tubos. A validação experimental demonstrou que os resultados da simulação estavam de acordo com as medições reais.



**FIGURA 3.** Simulação do processo de derramamento de vidro fundido no software COMSOL. Estes resultados mostram a região de escoamento de vidro fundido (esquerda, em verde) e as deformações no bloco de formação (direita).

### ⇒ APLICATIVOS DE SIMULAÇÃO MELHORAM A COLABORAÇÃO

"Para criar tais modelos especializados, é necessário ter experiência em simulação e conhecimento do sistema a ser simulado", explica Hong. A maneira mais eficiente de compartilhar este conhecimento com outras pessoas na empresa é se aproveitar das vantagens do Application Builder disponível no software. Os especialistas de simulação podem personalizar seus modelos para que somente parâmetros escolhidos sejam acessíveis pelo usuário. A interface individualizada se baseia no modelo, que pode ser distribuído internamente para permitir que os colegas rodem análises complexas independentemente.



**FIGURE 4.** Simulação para prever o estado do vidro dentro do tubo de aquecimento. Topo: Tubo reto com parede de espessura não uniforme. Inferior: Tubo Z com parede de espessura uniforme. Esquerda para a direita: resultados da simulação ilustrando a distribuição de densidade de corrente e distribuição de temperatura.

A equipe de simulação reporta-se ao departamento de P&D da KMTC, mas o aplicativo de simulação estendeu seu trabalho ao departamento de engenharia. O próximo desafio é tornar a simulação acessível diretamente para os clientes. Então, eles podem fazer ajustes detalhados conforme suas necessidades de projeto, sem precisar de conhecimento especializado sobre o modelo multifísico subjacente.

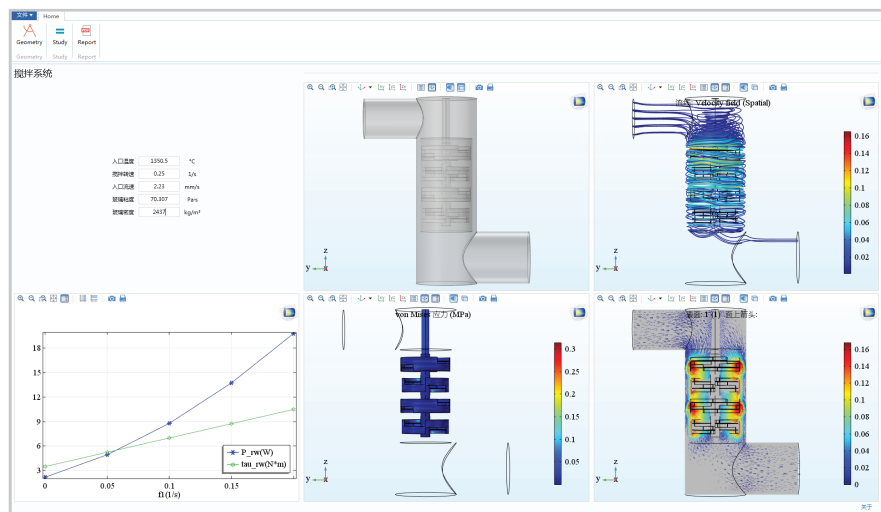
A equipe de simulação da KMTC criou um aplicativo para estudar o canal de platina. O aplicativo pode ser usado para calcular a temperatura e velocidade do fluido, além da distribuição de tensões no tubo de aquecimento durante a fabricação, para prever os níveis de tensões e o estado final do vidro (Figura 5). Os parâmetros de entrada disponíveis para os usuários do aplicativo incluem a temperatura do vidro, velocidade na entrada e a potência de aquecimento. Uma análise estacionária avalia e otimiza as condições operacionais, enquanto uma análise dependente do tempo simula os processos de fabricação em tempo real. O aplicativo fornece os dados necessários para definir as instruções de produção da unidade.

"É bastante conveniente para os engenheiros poder modificar os parâmetros de entrada por meio da interface do aplicativo para, por exemplo,

prever o estado do vidro dentro do tubo de aquecimento, diz Hong. "Isso simplificou o trabalho dos projetistas e ao mesmo tempo melhorou a eficiência da equipe."

O fluxo geral de trabalho de simulação foi simplificado. Os especialistas de simulação trabalham com um modelo matemático parametrizado com inclusão de vários parâmetros de projeto para uso futuro, e em seguida transformam o modelo num aplicativo de simulação que é disponibilizado para outros engenheiros. Os projetistas que não estão familiarizados com simulação multifísica podem resolver problemas práticos de forma flexível e eficiente.

A equipe disponibiliza os aplicativos de simulação aos colegas usando o produto COMSOL Server™ instalado em um cluster, para suportar as solicitações dos departamentos de engenharia e P&D. Os usuários são capazes de rodar os aplicativos com base nas demandas dos clientes e fornecer insights imediatos sobre o processo de fabricação. "Os aplicativos de simulação são uma grande ferramenta para o desenvolvimento de longo prazo da equipe de simulação CAE, pois levam em consideração tanto informações de custo como informações de segurança", diz Hong. ❖



**FIGURA 5.** Aplicativo usado para prever o estado do vidro dentro do tubo de aquecimento. Os usuários podem alterar parâmetros como a temperatura do vidro, velocidade na entrada e potência de aquecimento nas várias seções para investigar a temperatura do fluido, velocidade e esforços no tubo de aquecimento.



Da esquerda para a direita: Zhenlong Yang, Jiming Yang, Liyao Tao, Lixin (Frank) Hong: Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento da KMTC.

# IMPULSIONE AS VENDAS E CONSTRUA RELACIONAMENTOS MAIS SÓLIDOS COM APLICATIVOS DE SIMULAÇÃO

Os especialistas em simulação multifísica da GrafTech estão aperfeiçoando o processo de vendas com o uso de aplicativos multifísicos na empresa e fora dela.

por **NATALIA SWITALA**

Apesar da equipe de vendas normalmente não pensar nos especialistas em simulação como um recurso do seu ciclo de vendas, é possível realizar muito quando reunimos pessoas de vários departamentos. Rick Beyerle é cientista sênior do grupo de Inovação e Tecnologia da subsidiária Advanced Energy Technologies (AET) da GrafTech. Ele vem colaborando com as equipes de vendas para introduzir aplicativos de simulação nos processos de vendas dos produtos de carbono e grafite.

## ⇒ CONSTRUINDO CONFIANÇA PARA GANHAR CLIENTES

Rick e seus colegas usam simulação multifísica para examinar o desempenho elétrico, estrutural e térmico do carbono e do grafite, bem como para otimizar o projeto e processo de várias aplicações industriais. Na colaboração com a equipe de vendas, ficou claro que construir a confiança com os possíveis clientes é um dos fatores mais importantes do ciclo de vendas. "Muitas vezes, as provas de conceito que fornecemos para os possíveis compradores servem como elementos construtivos para desenvolver a confiança entre as duas partes", explica Rick.

Antes de haver aplicativos de simulação personalizados disponíveis, essa "prova de conceito" exigia que Rick e sua equipe desviassem seus recursos de P&D para modificar e repetir modelos validados, conforme as configurações específicas de cada cliente. A equipe de vendas não tinha treinamento em modelagem numérica e os engenheiros de aplicação eram instruídos a priorizar testes reais em vez de simulações demoradas. "Alguns modelos

contam com centenas de parâmetros e condições de contorno que não parecem significativas para leigos, mas que afetam significativamente os resultados da simulação", diz Rick.

## ⇒ APLICATIVOS DE SIMULAÇÃO SÃO UM CAMINHO PARA A COLABORAÇÃO

Rick é um visionário que está empenhado em usar a simulação de novas maneiras para beneficiar a organização como um todo. Com o Application Builder disponível no software COMSOL Multiphysics®, Rick e uma equipe de engenheiros de aplicação criaram uma interface simples baseada em seu modelo multifísico padrão. O resultado é o 'SpreaderCalc', um aplicativo que permite que os engenheiros de vendas e especialistas de campo prevejam o desempenho de uma gama de protótipos virtuais antes de testar um caro protótipo físico (veja a Figura 1).

Obter grandes resultados tecnológicos e de vendas exige o esforço de toda a empresa. É por isso que Rick queria fornecer ferramentas de software para seus colegas no departamento de vendas para colaborar e oferecer respostas em tempo real para possíveis clientes. "Frequentemente, um possível cliente pede que recomendemos opções de gerenciamento térmico, não somente para atender requisitos de segurança ou confiabilidade, mas também para maximizar sua experiência removendo limitações de temperatura, especialmente quando sob restrições específicas de

espaço e geometrias" comentou Pierre Hatte, diretor de vendas.

## ⇒ COLOCANDO APLICATIVOS NAS MÃOS DOS CLIENTES

Depois que os aplicativos de simulação ficam prontos para a equipe de vendas, eles podem ser implementados com o produto COMSOL Server™, que centraliza os aplicativos e os disponibiliza por meio de uma conexão da web segura. "Com os aplicativos de simulação, não é necessário configurações específicas de cada cliente. A equipe de vendas não tinha treinamento de modelagem numérica e os engenheiros de aplicação tinham sido instruídos a priorizar testes presenciais em vez de simulações demoradas. "Alguns modelos contam com centenas de parâmetros e condições de fronteira que não parecem significativas para leigos,

**“Mostrar para um possível cliente como o aplicativo compara a transferência de calor entre as várias configurações é como deixar o cliente experimentar um terno antes de comprar. Ele tem confiança que os resultados estarão adaptados às suas necessidades”**

— PIERRE HATTE, DIRETOR DE VENDAS, GRAFTECH

mas que afetam significativamente os resultados da simulação", diz Rick.

Uma vez que a equipe de vendas está totalmente equipada com os aplicativos e já testou os vários possíveis cenários do ciclo de vendas, a empresa disponibiliza os aplicativos para os clientes através do uso do COMSOL Server. "Até agora, fornecíamos um modelo personalizado para o cliente por ano. A política dizia que as simulações eram muito caras para fornecer a todos os clientes", ele continua. "Agora, elas custam o valor de uma hora do tempo de um engenheiro de aplicação para rodar um Projeto de Experimentos (DoE) de modelos, em vez de executar uma série de testes por semana" Os aplicativos fornecem ao cliente uma sensação de confiança em nossos produtos", diz Pierre. "Eles são intuitivos, fáceis de usar e ao mesmo

The screenshot shows the GrafTech International COMSOL Server Application Library interface. The main window displays the 'SpreaderCalc' application, which is a 'Heat Spreader Sizing Tool'. The interface includes a sidebar with 'Application Library', 'Upload', and 'Your Settings'. The main area shows a table of material layers (L1-L8) with properties like thickness, grid, and thermal conductivity. It also features a 3D mesh visualization of a heat spreader, temperature results (Average: 53.96°C, Maximum: 54.57°C), and various configuration options for heat sources and viewing.

**FIGURA 1.** Usando uma instalação local do produto COMSOL Server™, a GrafTech AET permite que colegas ao redor do mundo acessem os aplicativos na intranet da empresa. O aplicativo SpreaderCalc compara a transferência de calor entre as lâminas de grafite que dissipam o calor em produtos eletrônicos.

tempo poderosos, pois se baseiam num modelo multifísico desenvolvido por nossos especialistas. Mostrar para um possível cliente como o aplicativo compara a transferência de calor entre as várias configurações é como deixar o cliente experimentar um terno antes de comprar. Ele tem confiança que os resultados estarão adaptados às suas necessidades".

"Nós pre vemos que os aplicativos possibilitarão que os clientes tomem decisões com mais informações antes de colocar pedidos. Alguns departamentos de compras são obrigados a reduzir custos e, ocasionalmente, desconsiderar as especificações de engenharia. Sem assistência técnica, eles são forçados a justificar materiais de alto desempenho quando a única métrica é o preço", diz Rick.

"A simulação do grafite é desafiadora devido às altas relações ortotrópicas. Era impossível obter até mesmo uma análise "ruim". Agora, os engenheiros podem

obter uma "boa" estimativa sem saírem de suas mesas. Para mim, este é o ponto fundamental — o software COMSOL permite realizar algo específico que não é possível de outra maneira."

Os aplicativos de simulação também promovem a colaboração e a transparência. Por exemplo, os aplicativos permitem que os clientes apresentem suas opções de compra às suas organizações sem nenhum esforço. Com o COMSOL Server, tudo que o cliente precisa saber são as informações de login para rodar o aplicativo e baixar os resultados. Desta maneira, todos ficam mais confortáveis para aprovar o pedido de compra. Baseado no sucesso do SpreaderCalc, e expandindo sua infraestrutura de software, a GrafTech AET já está criando variantes para auxiliar mercados de nicho, tais como materiais de interface térmica, blindagem EMI/RFI e processos de aquecimento rápido. ❖

## SAIBA MAIS

Se estiver interessado em conhecer mais sobre as aplicações industriais do carbono e grafite em gerenciamento térmico, leia o artigo publicado na página 3 da Multiphysics Simulation 2016 [www.br.comsol.com/offers/mpsim16].

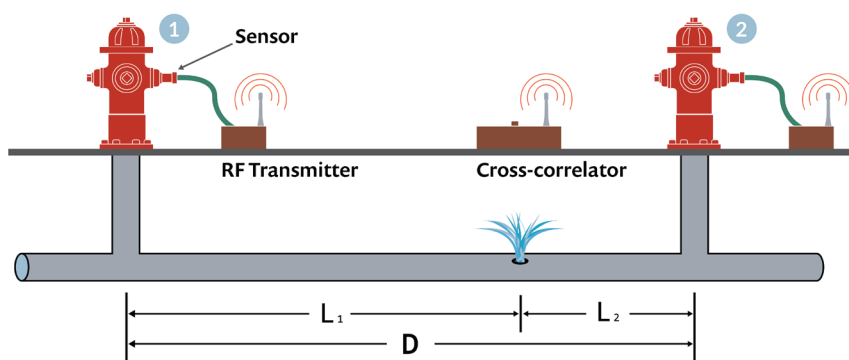


Esquerda: Pierre Hatte, Diretor de Vendas, GrafTech. Direita: Rick Beyerle, cientista sênior, GrafTech.

# ANÁLISE MULTIFÍSICA MELHORA 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 LeakFinderST™ é compacto e intuitivo.



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-



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 de 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

“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 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

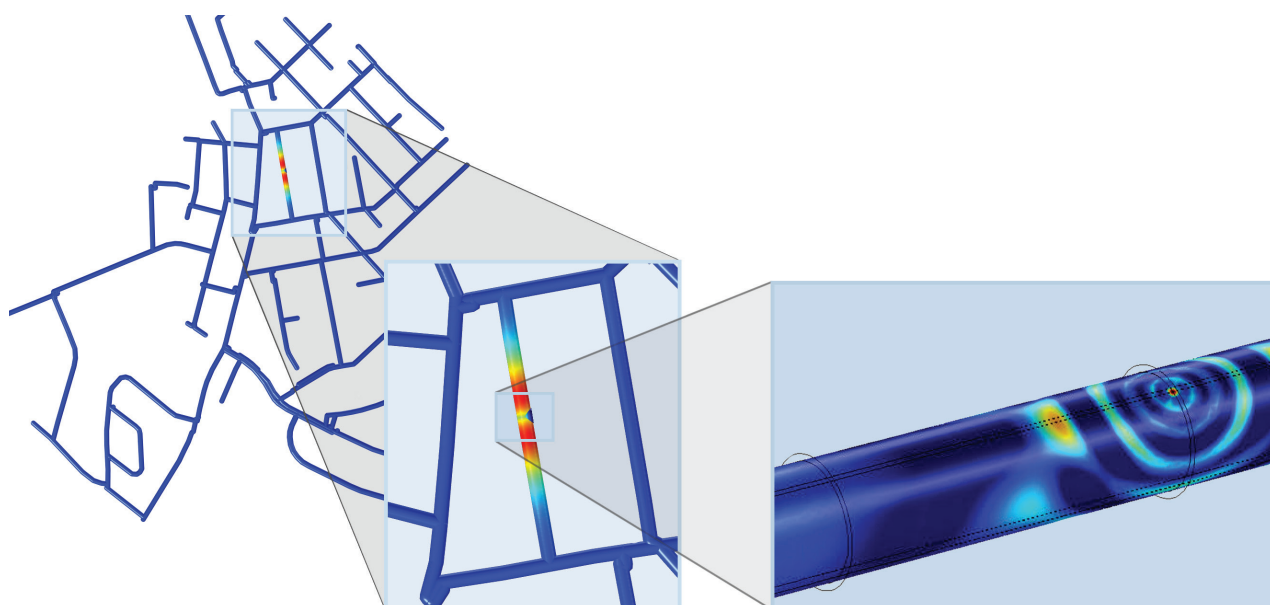


FIGURA 4. Análise de propagação do som do ruído de um vazamento numa rede de tubos. O gráfico mostra a pressão acústica na área ao redor do vazamento.

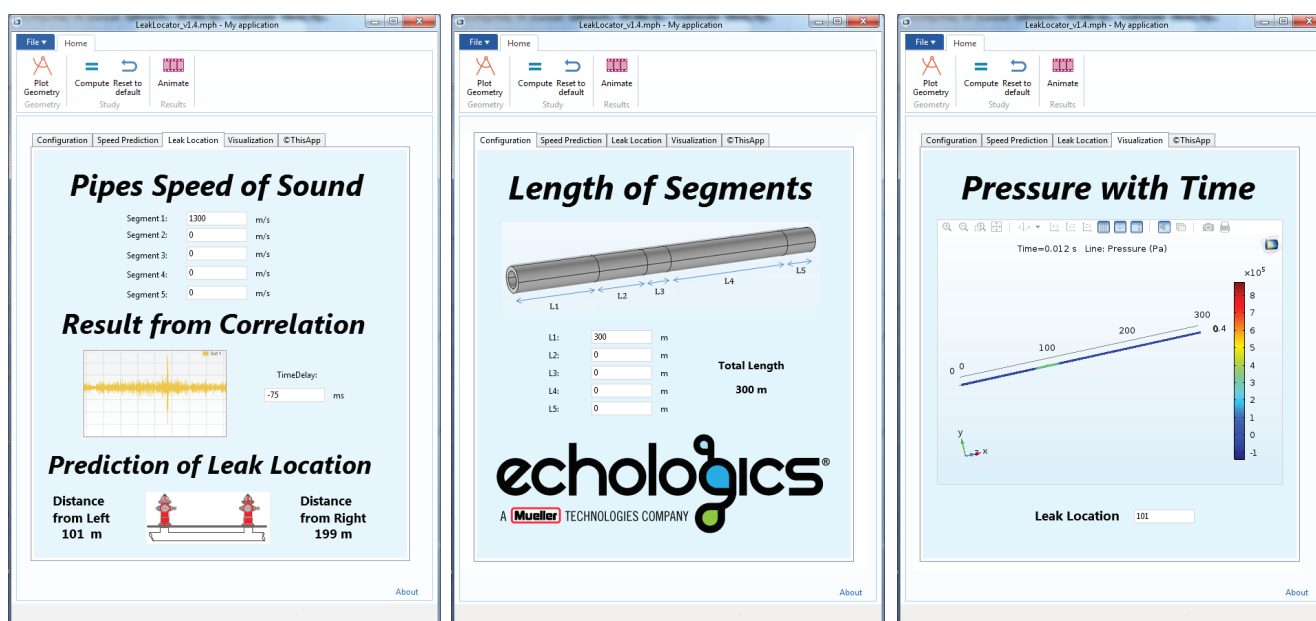


FIGURA 5. A interface simples guia o usuário para prever o local preciso do vazamento, definidas as características do tubo e da geometria. O aplicativo calcula a velocidade do som no tubo e permite que o usuário visualize, com uma animação, a propagação do som a partir do local do vazamento, enquanto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

o aplicativo para que pudesse ser usado pelos engenheiros de campo, no local.

Ele espera que o aplicativo seja amplamente usado na Echologics. O 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.



# Impulsionando a Direção Eletrohidráulica com Protótipos Virtuais

A FZB Technology usa simulação multifísica para direcionar melhorias de projeto em sistemas de direção eletrohidráulica.

por **LEXI CARVER**

Se você já dirigiu um carro sem assistência de direção, deve se lembrar de ter que fazer bastante força no volante para virar os pneus conforme os movimentos desejados. Felizmente, estes dias já estão no passado. Os sistemas de direção assistida — que tornam a direção muito mais confortável por meio de engrenagens — passaram por várias iterações ao longo dos anos e continuam a evoluir com projetos aperfeiçoados.

Até os anos 90, as versões mais comuns eram a direção hidráulica e a direção elétrica. Porém elas foram as precursoras do nascimento de um método muito mais eficiente em termos de consumo de combustível, chamado direção eletrohidráulica (EHPS). A EHPS foi criada a partir da configuração hidráulica convencional, mas conta com um motor elétrico para acionar uma bomba hidráulica, em vez de usar a potência do motor do carro (Figura 1). Como a potência do motor elétrico é ajustada conforme o ângulo do volante e velocidade do veículo, menos energia é desperdiçada.

A bomba envia o fluido de um reservatório para a caixa de direção, que aplica torque adicional para rotacionar os pneus quando o motorista gira o volante. O sistema também tem uma unidade de controle eletrônico (ECU), sensor de torque, válvula para controlar a pressão do fluido e um sistema de tubulação.

## ⇒ A COMPLEXIDADE DO SISTEMA EHPS

Projetar um sistema com tantos componentes relacionados não é uma tarefa fácil, pois a reposta de uma parte frequentemente depende de outra. Ajustes aparentemente pequenos podem afetar significativamente o funcionamento, eficiência e a confiabilidade.

"A simulação multifísica é uma ferramenta que acelera o processo de refinamento do projeto", explica Feng Qi, engenheiro mecânico sênior da FZB Technology em Plymouth, MI. A FZB oferece P&D para o mercado automotivo, incluindo o desenvolvimento de motores, sensores, sistemas de ignição RFID sem chave e também EHPS.

Os engenheiros da FZB usam frequentemente CAD e o software COMSOL Multiphysics® para modelar os componentes de seus projetos de EHPS (Figura 2). Isso os ajuda a entender o comportamento dos mecanismos internos do sistema e também a chegar o mais perto possível do projeto final, antes de passar do protótipo virtual para os testes físicos.

"A simulação ajuda a entender claramente um problema

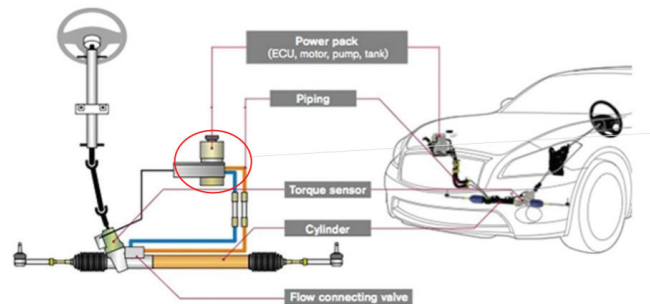


FIGURA 1. Esquema de um sistema de direção eletrohidráulico (EHPS).

para podermos atender aos requisitos automotivos antes de construir um modelo físico", comenta Qi. "Precisamos conhecer o desempenho do sistema em vários níveis: mecânico, térmico, fluido, acústico e eletromagnético."

Ele explica que os processos de testes físicos e validação são caros e demorados, podendo levar até 6 meses — e mesmo assim, após os testes, o protótipo bem sucedido ainda precisa ser otimizado. "Isso seria muito lento para o ciclo de projeto, então usamos simulação para acelerar o processo. Falamos constantemente com os engenheiros, por exemplo, da Chrysler, para melhorar nosso projeto no software COMSOL antes de qualquer validação física. Caso contrário, não seríamos capazes de atender aos requisitos."

Buscando conhecer o comportamento sob o capô, a

equipe de Qi na FZB modelou os principais componentes do seu último projeto de EHPS: ECU, suporte de montagem isolado, motor de ímãs permanentes, reservatório de fluido e bomba de engrenagens helicoidais. Eles fizeram simulações de cada peça separadamente, mas também conduziram análises multifísicas no complexo conjunto completo, cujo projeto é diferente para cada modelo de veículo.

Estas análises dos fenômenos térmicos, mecânicos, fluidos e eletromagnéticos ajudaram a equipe a resolver mais rapidamente problemas relacionados ao desempenho térmico, controle de movimento dinâmico, entrega de fluido pela bomba, e ruído, vibração e qualidade sonora (NVH) (Figura 3)

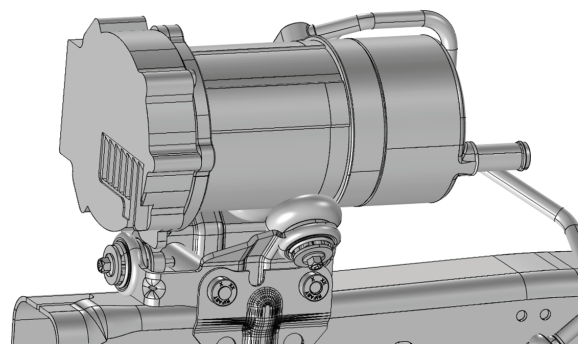
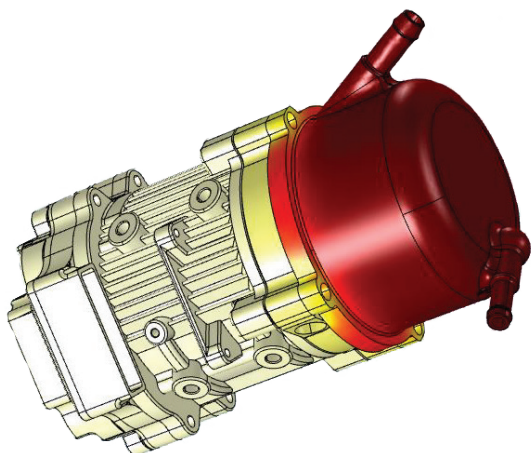
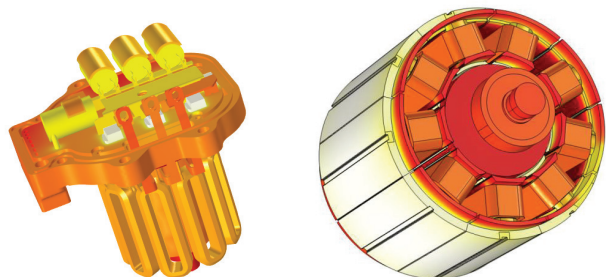


FIGURA 2. Geometria usada na análise multifísica do projeto do EHPS. Este projeto contém aletas para auxiliar na transferência de calor para o ar ao redor, componentes de montagem e orifícios para o fluido.



**FIGURA 3.** Simulações estacionárias e transientes realizadas para obter a distribuição de temperatura em várias partes, testando-se a bomba sob várias cargas do veículo. Os resultados da simulação sugeriram a faixa ideal de geometria local, os parâmetros de projeto do motor, o tamanho e número de vias da ECU e outras características de condução térmica.



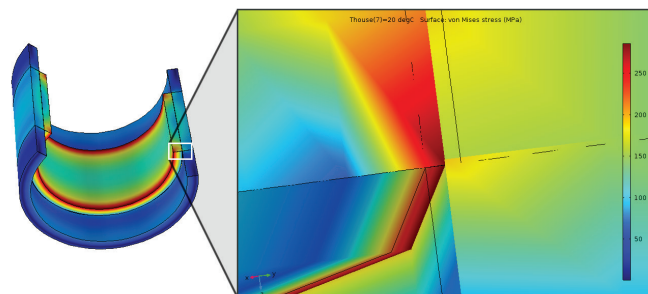
**FIGURA 4.** Temperatura no conjunto da ECU e rotor (esquerda), e no conjunto do estator e rotor (direita). O modelo prevê o desempenho térmico do sistema com o produto instalado no veículo.

### ⇒ CALOR SOB O CAPÔ

Um dos principais fatores de desempenho do sistema é a capacidade de operar numa faixa de temperatura segura. Qi criou um modelo que considera a transferência de calor na bomba e a geração de calor no fluido que lubrifica as engrenagens de direção. Usando a temperatura do fluido como condição de contorno variável, sua equipe foi capaz de prever a distribuição de temperatura por todo o sistema em cenários operacionais distintos.

Qi explica que a bomba fica submetida aos maiores esforços quando as rodas do carro estão travadas contra o meio-fio enquanto o motorista tenta virar. Quando isso acontece realmente, a bateria do carro ainda envia potência para a bomba, mesmo com as rodas travadas, gerando calor na ECU e no ímã do motor.

Com base nas condições operacionais fornecidas por fabricantes de veículos, sua equipe foi capaz de modelar o comportamento do fluido de direção hidráulica neste cenário. Eles também estudaram a reposta dos componentes da ECU, tais como os MOSFETs e a fiação, aos níveis de temperatura atingidos devido à geração



**FIGURA 5.** Níveis de tensões numa simulação que analisa o ajuste por interferência da carcaça com o estator.

de calor que ocorre quando as rodas do carro estão travadas. Eles usaram o método de modelagem em múltiplas escalas, que começa com simulações dos componentes específicos que são integradas até o nível do sistema, e correlacionaram os resultados com os dados dos testes físicos. Com esta análise, eles foram capazes de ajustar as condições de contorno e propriedades dos materiais para entender as várias configurações.

A distribuição de temperaturas também afeta componentes estruturais, tais como a carcaça, estator, rotor e bielas do motor (Figura 4). A expansão térmica do metal afeta a eficiência do motor, exigindo mais torque e RPM para fornecer a potência de saída desejada na bomba. As propriedades do fluido, tais como viscosidade dinâmica e densidade, também mudam com a temperatura, exigindo o ajuste das engrenagens para manter a condução suave e consistente.

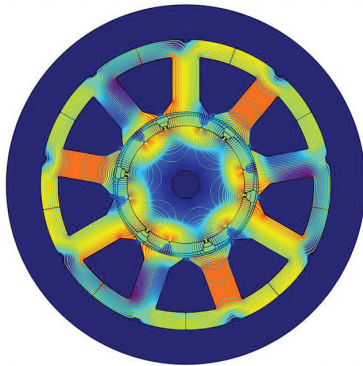
"Esta é a situação mais desafiadora, quando o veículo não está em movimento e a bomba tem que fazer muito esforço adicional", diz Qi. "Queremos ficar na faixa de temperatura em que as peças não falharão, então modelamos situações extremas para garantir que elas suportariam e teriam desempenho satisfatório."

Qi modelou alterações na espessura da parede do motor, estator e bomba devido à expansão térmica e para observar verificar se os níveis de esforços excediam a tensão de elástica de alguma peça (Figura 5). O estator do motor representou um desafio único, pois a expansão térmica causava falha. Como eles deduziram isso logo no começo, a partir dos resultados da simulação do COMSOL, a equipe adicionou um sulco que permite a alteração de forma sem causar problemas.

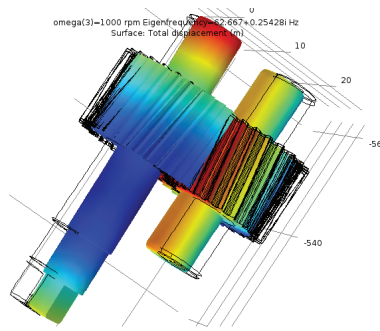
Este fator geométrico se tornou crítico ao considerar o ajuste por interferência da carcaça com o estator. Como a carcaça e o estator possuem coeficientes de expansão térmica (CTE) diferentes, a quantidade de interferência e espessura geométrica foram determinadas cuidadosamente para garantir que as peças não apresentassem falha dentro da faixa de temperatura.

*"Conduzir um veículo do conceito ao mercado depende de vários fatores... Nós necessitávamos de uma ferramenta verdadeiramente multifísica para executar este trabalho em equipe interdisciplinar."*

— STEVEN QI, GERENTE, FZB



**FIGURA 6.** Simulação mostrando a densidade do fluxo magnético e o potencial vetor magnético num estudo transiente do comportamento do motor do EHPS.



**FIGURA 7.** Resultados do COMSOL mostrando o deslocamento das engrenagens helicoidais para 1000 RPM e frequência de 2718,2 Hz, após a importação dos dados da análise de fluido no software PumpLinX®

obter a eficiência de fluido, taxa de vazão e oscilações de pressão.

Qi transferiu os dados do escoamento para seu modelo no software COMSOL Multiphysics®, atualizou a geometria através do software SOLIDWORKS®, e então criou uma simulação acústica para estudar as vibrações (Figuras 7 e 8). Uma simulação rotodinâmica adicional ajudou a identificar as velocidades críticas nas quais a vibração aumentaria dramaticamente, causando falha das engrenagens. Isso geraria ruído anormal e reduziria a eficiência.

"Precisávamos não apenas saber quão ruidoso seria o sistema, mas também entender como ele afetava o comportamento eletromagnético e do fluido", diz Qi. "Está tudo interconectado. Modelamos a oscilação de pressão no fluido e usamos o COMSOL para analisar como a oscilação alterava o ruído pelo ar. A partir dos resultados, fomos capazes de otimizar os rolamentos, eixos e o formato das engrenagens helicoidais e ranhuras de alívio de pressão do fluido no embuchamento da bomba de engrenagens helicoidais."

## ⇒ PREPARANDO O CAMINHO PARA APERFEIÇOAR EHPS

Por fim, a equipe da FZB fez melhorias de projeto significativas na geometria da sua bomba, com base nos resultados do COMSOL. A partir das simulações, eles também geraram um relatório de limites de consumo de potência para guiar os engenheiros de projeto e atender aos requisitos automotivos.

## ⇒ FLUIDO, RUÍDO E ELETRÔNICA TÊM SEU PAPEL

A equipe também construiu um modelo eletromagnético para analisar o desempenho do ímã helicoidal e da bomba de engrenagem helicoidal em momentos diferentes durante o processo de bombeamento (Figura 6). Isso permitiu entender o comportamento do motor ao longo do tempo, incluindo uma estimativa precisa da perda de calor nas bobinas e no ferro. Assim, a geometria foi alterada para acomodar uma distribuição de temperatura mais uniforme entre os componentes e peças.

A equipe acoplou a simulação eletromagnética a análise CFD para entender a influência sobre a entrega de fluido e a eficiência da bomba. Eles usaram o software PumpLinX®, um programa projetado especificamente para modelar bombas, para

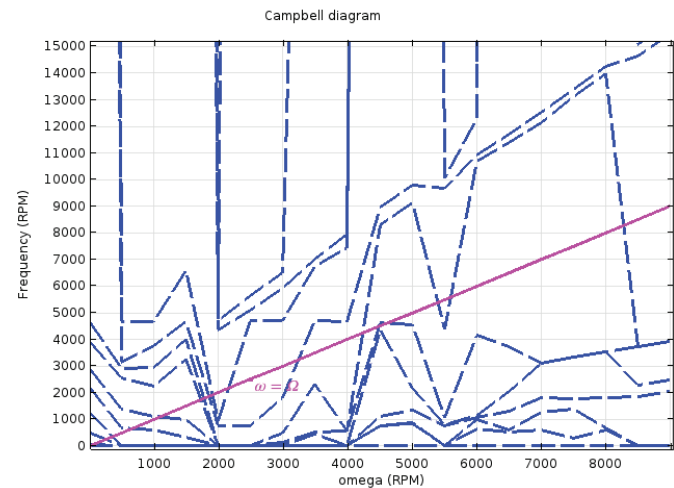
Eles estudaram como diferentes condições de contorno afetam o consumo de energia e a potência de saída da bomba e compararam os resultados da simulação dos vários cenários com os dados dos testes reais de direção.

"Escolhemos o COMSOL devido à necessidade de analisar todo o comportamento físico acoplado", conclui Qi. "Levar um veículo do conceito ao mercado com sucesso, depende de vários fatores e o tempo do ciclo de projeto pode ser muito apertado. Precisávamos de uma ferramenta multifísica para realizar este trabalho em

equipe multidisciplinar. O COMSOL é uma ferramenta muito poderosa que verdadeira interliga várias áreas da física com condições de contorno diferentes, a qual um panorama preciso do desempenho do projeto de nossos EHPS." ❖

## REFERÊNCIAS

1. Qi, F., Dhar, S., Nichani, V., Srinivasan, C. et al., "A CFD study of an Electronic Hydraulic Power Steering Helical External Gear Pump: Model Development, Validation and Application," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.



**FIGURA 8.** Diagrama de Campbell gerado no COMSOL, mostrando a variação das frequências naturais com a velocidade angular das engrenagens helicoidais.



Linha superior: Jinming (Jim) Yang, CEO, Zhonghui (Max) Bing, Diretor, Steven Qi, Gerente, FZB.

Linha inferior: Liang (Leon) Yang, Gerente, FZB, Dahong Yu, Diretor Executivo, Ying Xie, Gerente, Fuxin Dare Automotive Parts Co., Ltd., China.

# O QUÃO RÁPIDO AS TEMPERATURAS ELEVADAS ATINGEM O INTERIOR DAS CÉLULAS?

A simulação numérica é usada para investigar o empilhamento de células de íon de lítio durante a fabricação de sistemas de bateria de alta qualidade.

por **JENNIFER HAND**

O desempenho e durabilidade de baterias de íon de lítio (Li-ion) é significativamente afetado pela temperatura operacional. Seu desempenho reduz a baixas temperaturas a bateria degrada rapidamente a altas temperaturas. Isso significa que a confiabilidade geral é comprometida, criando possíveis questões de segurança.

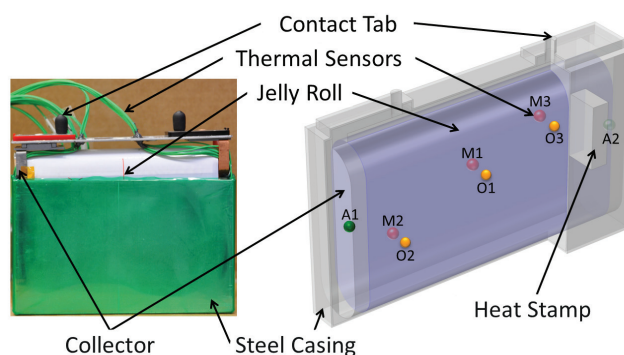
Pesquisas do setor resultaram em normas que regulam a capacidade das baterias de suportar flutuações de temperatura durante o funcionamento. Por outro lado, não há muito foco nas temperaturas às quais as baterias são expostas durante o processo de fabricação, que pré-tratamento com plasma, cura UV, solda a laser, união ultrassônica, empilhamento a quente e colagem a quente. Uma bateria de íons de lítio pode conter milhares de células individuais, que devem estar empilhadas. Normalmente, isso é feito por meio de um procedimento de montagem que pode envolver vários tratamentos térmicos, inclusive alguns que podem ser extremamente intensos, e expor a carcaça ou outras peças a temperaturas altas por curtos intervalos de tempo.

Gerd Liebig do Centro de Pesquisa de Tecnologia de Energia NEXT ENERGY EWE, da Universidade de Oldenburg, Alemanha, explica: "Já é sabido que determinados processos, tais como soldagem, aumentam significativamente a temperatura dentro da bateria. O que não se sabe é o quanto tais temperaturas elevadas são capazes de se propagar internamente e comprometer a célula."

Pamina Bohn, da Universidade de Oldenburg, e cientistas da NEXT ENERGY iniciaram uma colaboração para investigar se o processo de fabricação poderia causar danos irreversíveis que afetam a estabilidade e capacidade devido ao surgimento de um processo de degradação eletroquímico. Como os experimentos podem ser demorados e caros devido a várias precauções de segurança, a estratégia traçada foi a de validar o modelo matemático. A equipe de pesquisa usou simulação numérica para investigar cenários operacionais diferentes e colocar sondas para inspecionar os resultados em qualquer ponto do modelo, o que é pouco prático, se não impossível, durante experimentos.

## ⇒ PROJETO DE EXPERIMENTO DE ESTRESSE TÉRMICO

O primeiro passo foi definir um experimento físico para medir as temperaturas atingidas dentro da célula de íons de lítio



**FIGURA 1.** Esquerda: Célula de íon de lítio prisma fictícia. Direita: a geometria CAD usada para modelar a célula. A célula é equipada com 8 sensores de temperatura: O1, O2 e O3 na superfície jelly roll; M1, M2 e M3 no meio do jelly roll; e A1 e A2 conectados aos condutores de corrente. Sondagens foram colocadas no modelo COMSOL® nos mesmos locais.

prisma fictícia sujeita a estresse térmico de curta duração. O objetivo era coletar dados que pudessem ser usados para validar o modelo matemático e investigar o efeito de vários processos durante a fabricação da célula. A célula era composta por um ânodo e um cátodo com revestimentos duplos, cercados por um separador de poliolefina e enrolados juntos. A estrutura enrolada, conhecida como jelly roll, foi embebida com solventes orgânicos para imitar o eletrólito da bateria. Foram colocados 8 sensores de temperatura na célula: 3 no meio do jelly roll, 3 na superfície do enrolamento da célula e 2 nos coletores de corrente de cobre e alumínio do ânodo e cátodo (Figura 1).

## ⇒ MODELAGEM DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

A equipe também criou uma réplica 3D de uma célula de íons de lítio prisma comercial no software Autodesk® Inventor® e importou para o software COMSOL Multiphysics®. Eles modelaram a transferência de calor por condução devido à fonte de calor externa em várias posições da célula, correspondentes aos diferentes processos de fabricação, e o resfriamento convectivo natural nas outras áreas da superfície da célula.

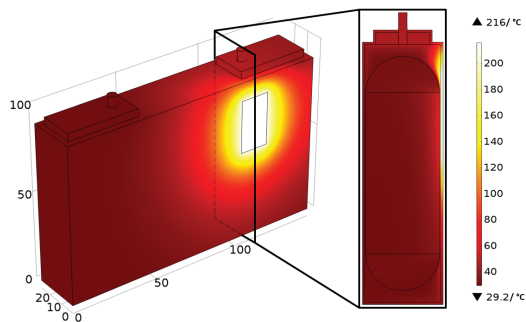
As propriedades físicas e térmicas dos materiais específicos foram definidas experimentalmente e homogêneas matematicamente em um único domínio jelly roll com carcaça prisma de aço. "Devido à natureza anisotrópica dos componentes da célula, foi necessário considerar a dependência direcional dos parâmetros térmicos no modelo", comenta Liebig.

Uma fonte de calor retangular foi posicionada na simulação da mesma maneira que no experimento físico. A Figura 2 mostra a distribuição de temperatura 60 s após a fonte de calor ser acionada. Refino adaptativo de malha foi utilizado para se obter uma discretização refinada nas regiões de grande gradiente de temperatura, garantindo resultados altamente precisos.

## ⇒ PROCURANDO SINAIS DE DANOS

O modelo multifísico chegou perto de replicar o comportamento da célula fictícia. Após validar o modelo, os membros da equipe puderam simular a propagação de temperatura dentro da célula devido a vários processos de fabricação.

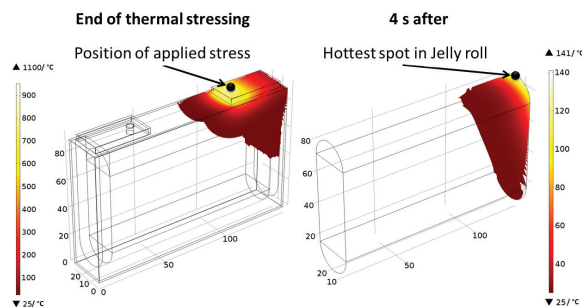
A Figura 3 ilustra a distribuição de temperaturas na aba da célula ao aplicar uma temperatura de 1100°C, normal em processos de solda, durante 4 segundos. O calor difunde pela



**FIGURA 2.** Resultados numéricos mostrando a distribuição de temperatura 60 s após acionar a fonte de calor de 50 W na superfície da carcaça da célula.

célula, aumentando a temperatura acima de 100°C. Mesmo depois de retirar a fonte de calor, a temperatura dentro da célula continua a aumentar, atingindo 138°C no jelly roll, 4 segundos depois de retirar a fonte de calor externa.

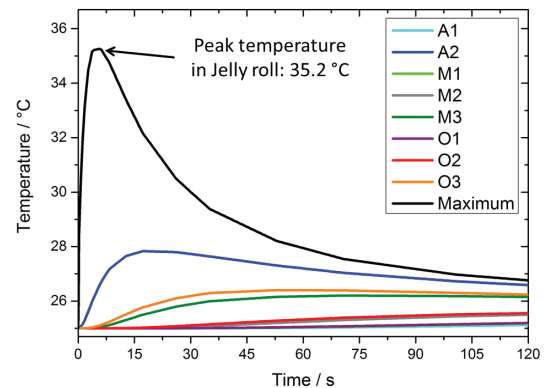
Bohn observa, "Este nível de temperatura induz danos irreversíveis, tais como decomposição do eletrólito, que é altamente sensível à temperaturas elevadas, e altera as características da interface sólido-eletrólito. Estes efeitos causam não somente danos locais nos materiais, mas também perda de capacidade geral e aumento da resistência da célula."



**FIGURA 3.** Simulação da propagação de temperatura após soldagem da aba a 1100°C. Distribuição de temperaturas após 4 segundos de estresse térmico (esquerda) e 4 segundos após a remoção da fonte de calor (direita).



Gerd Liebig e Lidiya Komsyska, NEXT ENERGY.



**FIGURA 4.** Perfis de temperatura da sonda após 4 segundos de estresse térmico a 1100°C.

### ⇒ FORNECENDO POTÊNCIA SEM DANOS

Os pesquisadores queriam confirmar que a alta densidade de potência de um do raio laser permite altas taxas de soldagem e ainda limita a entrada de calor na célula da bateria. Esta técnica é muito rápida e, por causa da alta densidade de potência do laser, uma grande variedade de metais pode ser usada.

Para simular a soldagem a laser, uma temperatura de 1100°C foi aplicada à aba da célula por 0,2 segundos (Figura 4). A equipe determinou que o calor se propagou pela carcaça da célula, causando temperaturas moderadas, que não excederam 36°C, as quais não são perigosas para os componentes da bateria. A distribuição de temperaturas simulada dentro do jelly roll está de acordo com as imagens termográficas obtidas vários segundos após a soldagem a laser numa célula de íons de lítio 26650.

### ⇒ UMA BASE PARA O FUTURO

Liebig afirma, "Agora temos uma ferramenta de simulação confiável. O software COMSOL Multiphysics é intuitivo e fornece ferramentas úteis. Ele é fácil de adaptar às nossas necessidades, tanto com relação a materiais como com relação às condições de contorno. As várias interfaces físicas, ferramentas de geometria e flexibilidade permitem economizar muito tempo."

A equipe concluiu: "Como há vários tipos de baterias para aplicações diferentes, não é possível determinar um material, tamanho ou formato perfeitos, e nosso modelo oferece um escopo enorme para futuras pesquisas. Podemos variar a geometria, a aplicação e os materiais. Graças à simulação numérica, podemos continuar a investigar as baterias de lítio com confiança." ❖

### REFERÊNCIAS

1. G. Liebig, P. Bohn, *Temperature Propagation and Effects by Short-Term Thermal Stressing of Lithium-Ion Cells*, Battery Safety Conf. 2015.
2. P. Bohn, S. A. Garnica Barragan, L. Komsyska, G. Wittstock, *Performance and the characteristics of thermally stressed anodes in lithium ion cells*, Journal of The Electrochemical Society, 162 (2) (2015).
3. P. Bohn, G. Liebig, L. Komsyska, G. Wittstock, *Temperature propagation in prismatic lithium-ion-cells after short term thermal stress*, Journal of Power Sources, Volume 313, 1 May 2016.
4. M.J. Brand, P.A. Schmidt, M.F. Zaeh, A. Jossen, *Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances*, J. Energy Storage 1 (2015).

# 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 despende 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 Brenno 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

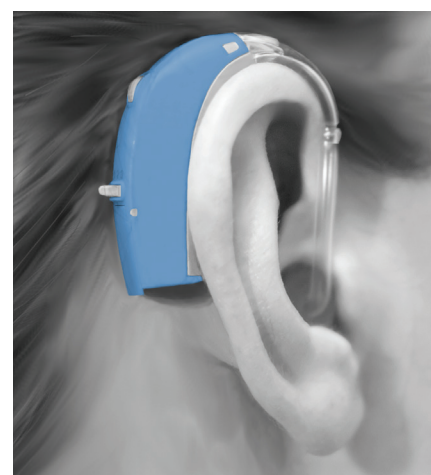
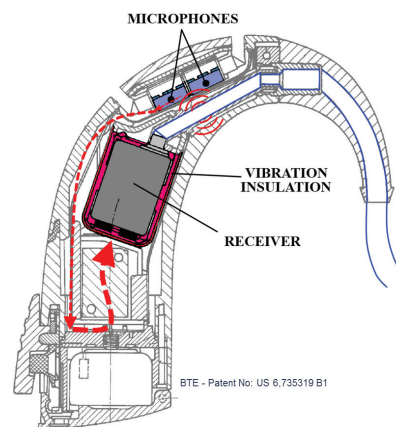
ser importante para os projetistas de transdutores da Knowles, toda essa complexidade não é necessariamente útil para nossos clientes", diz Varanda.

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 pequeno alto-falante também conhecido como receptor (Figura 1). O receptor, ou alto-falante, "recebe" os sinais elétricos amplificados e os converte



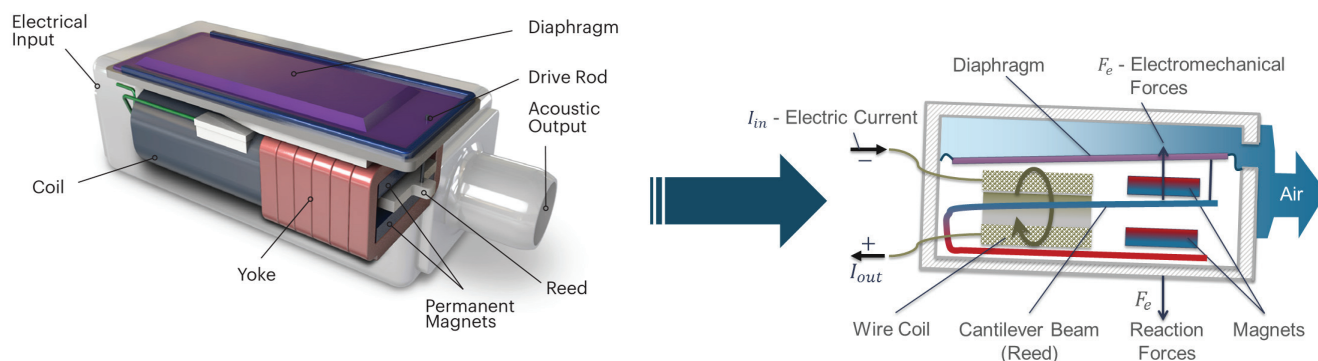
**FIGURA 1.** Um típico aparelho auditivo BTE inclui microfones, isolamento de vibração e um receptor, entre outros componentes. O pouco espaçamento entre estes componentes é um convite para problemas acústicos e retorno mecânico. (Crédito da imagem: Knowles Corp.)

em energia acústica, ou som, que em seguida é canalizado no canal auditivo por um tubo ou molde do ouvido.

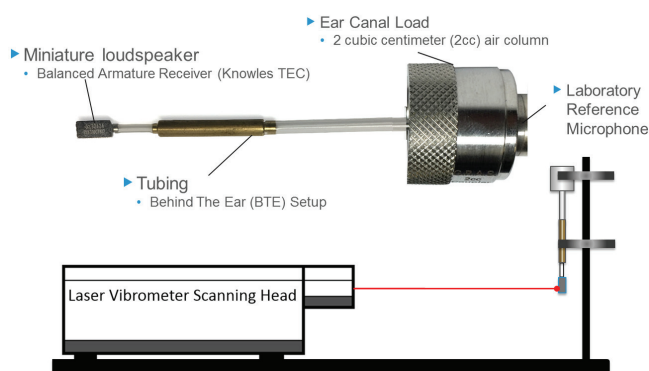
O receptor contém uma alavanca controlada eletromagneticamente, conhecida como palheta, conectada ao diafragma que gera som pelo seu movimento de oscilação. As forças eletromagnéticas internas também geram forças de reação que transmitem vibrações pelo encapsulamento do aparelho auditivo, criando som que é captado pelo microfone. Por sua vez, este sinal é ampliado pelo amplificador e devolvido novamente para o receptor, causando o retorno. Esse caminho é mostrado na Figura 1.

## ⇒ O MODELO "CAIXA PRETA"

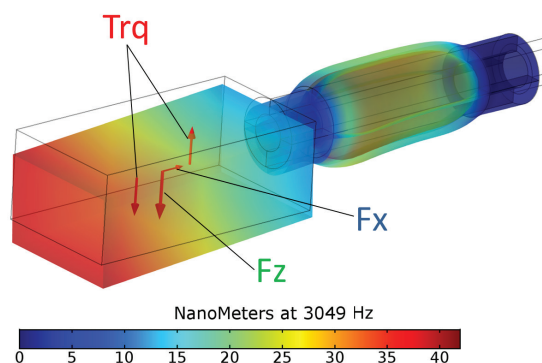
A única função do receptor é converter o sinal de tensão amplificado do



**FIGURA 2.** O receptor, um dos principais componentes dos aparelhos auditivos, contém um pequeno falante com um diafragma controlado eletromagneticamente que gera som. As forças eletromagnéticas internas causam vibração estrutural, que resulta em retorno mecânico.



**FIGURA 3.** Hardware e esquema de uma configuração experimental.



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

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

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."

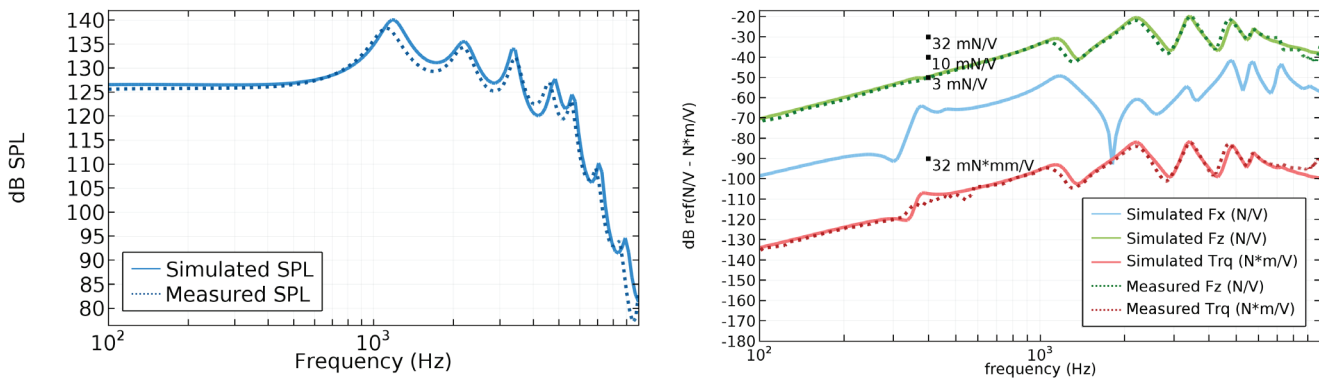
Agora, os projetistas de aparelhos auditivos são capazes de reduzir o retorno e melhorar o desempenho geral de forma mais rápida e mais econômica que anteriormente, oferecendo melhores opções para pessoas com problemas auditivos. ❖

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.

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



**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.



# BUSCA POR REGIÕES DE ARCO ELÉTRICO EM SISTEMAS DE SATÉLITE

Descarga de arcos elétricos em satélites em órbita pode causar falha de sistema, mas é difícil de prever. Os engenheiros do Institute of High Current Electronics (Instituto de Aparelhos Eletrônicos de Alta Corrente), na Rússia adotaram software multifísico para encontrar as regiões críticas onde as falhas são originadas e para proteger os equipamentos de bordo.

por **GEMMA CHURCH**

Em 1995, a Boeing Satellite Systems apresentou uma nova família de barramentos para satélites de comunicação, que contêm os sistemas de alimentação, controle e propulsão. Eles usaram um barramento de alta tensão conectado a uma fonte de alimentação estabilizada de 100 V, em vez da tensão padrão de 27 V. Isso aumentou a tensão operacional, reduziu as correntes operacionais e abaixou as perdas ôhmicas correspondentes nos condutores. Entretanto, isso também introduziu uma falha potencialmente catastrófica para os sistemas eletrônicos dos satélites: o arco elétrico (Figura 1).

Vasily Kozhevnikov, pesquisador do Institute of High Current Electronics, em Tomsk, Rússia, explica: "A transição para o novo padrão de tensões operacionais levou ao problema de ignição de arco elétrico entre os elementos das placas de circuitos eletrônicos. Para manter o peso do satélite o menor possível, o espaço dentro da carcaça do circuito não é preenchido com um isolante ou construído para manter vácuo. Entretanto, isso permite descarga de arco elétrico ou descarga em cascata que pode se espalhar numa grande quantidade de equipamentos de bordo."

"A ignição de arcos elétricos dentro do

sistema de bordo do satélite sempre leva a falha parcial ou completa. Na maioria dos casos, isso resulta no descarte do satélite", ele completou.

Esta pesquisa está intimamente ligada à física de uma descarga em gás sob condições extremas, nas quais o comportamento dos equipamentos elétricos nem sempre é ditado pela física convencional. Por exemplo, algumas vezes as descargas elétricas ocorrem abaixo de um limite conhecido como valor mínimo de Paschen, nos quais a tensão normalmente não deve

ser suficiente para iniciar uma descarga, ou arco elétrico, entre dois eletrodos.

"Acreditamos que esta pesquisa também poderá ser usada para realizar diagnósticos em aparelhos eletrônicos operados sob uma ampla gama de parâmetros tais como pressão, nível de ionização e assim por diante. Ela é amplamente aplicável além da indústria e ciência espacial", diz Kozhevnikov.

A medida que sistemas eletrônicos são usados em ambientes cada vez mais extremos, o arco elétrico não é

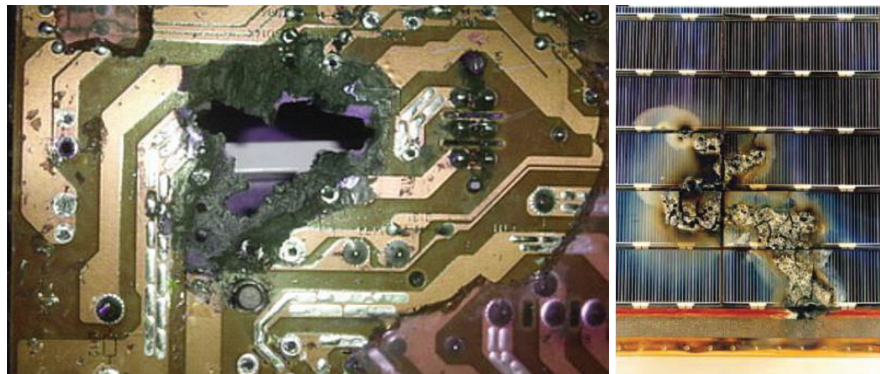


FIGURA 1. Danos típicos de um arco primário numa fonte de alimentação operando a 100 V.

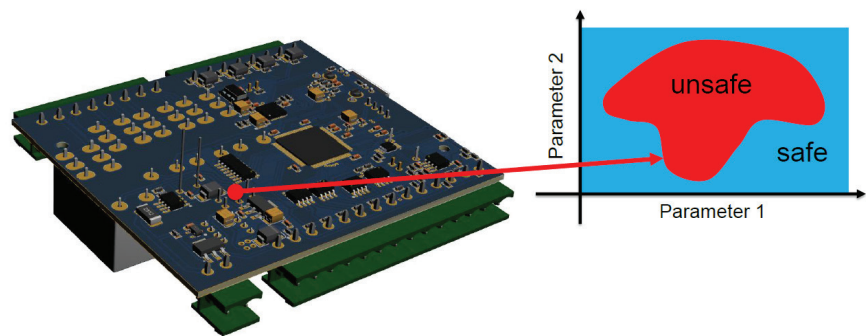
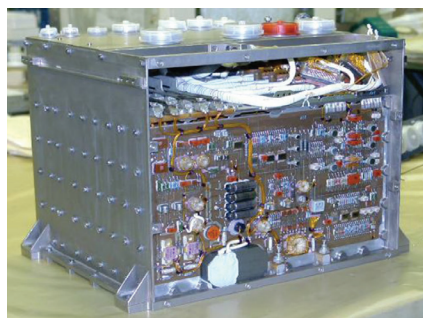


FIGURA 2. Exemplo de placa de circuito para equipamento de satélite. As regiões críticas tem menos de 5 mm de largura. Os engenheiros da IHCE devem determinar a faixa de condições operacionais e propriedades inseguras para projetar sistemas capazes de viajar a bordo de satélites sem serem destruídos.

um problema exclusivo da indústria espacial civil. Ele afeta todas as aplicações eletrônicas projetadas para realizar trabalho autônomo de longa duração com altos requisitos de tolerância à falha. Portanto, uma solução para este problema se estende além de satélites e se aplica também a sistemas terrestres e equipamentos submarinos.

⇒ **ENCONTRAR A REGIÃO CRÍTICA**

Para impedir a destruição de dispositivos eletrônicos de bordo por arco elétrico espontâneo, é necessário identificar a chamada "região crítica", que é a área onde ocorre ignição de descarga autossustentada. Uma vez encontrada a área potencialmente problemática, os engenheiros devem conduzir mais investigações para descobrir o que pode causar a descarga de um arco elétrico.

Os estudos experimentais não são

**“O COMSOL permitiu realizar nossa pesquisa sem ter que criar nosso próprio código computacional. Esperamos que seja muito promissor para nossas investigações futuras”**

– VASILY YU. KOZHEVNIKOV, COLABORADOR DE PESQUISA, IHCE

capazes de superar o desafio de identificar estes pontos, pois não são capazes de reproduzir a ampla gama de parâmetros operacionais que existem na órbita espacial.

A única opção investigativa restante, a simulação, também enfrenta desafios monumentais. Por exemplo, um dispositivo eletrônico de bordo típico é composto

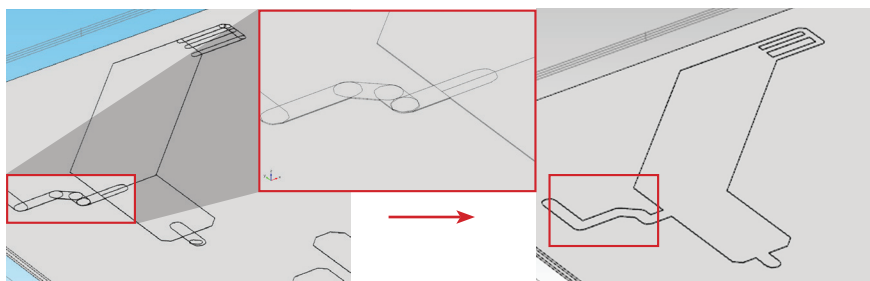


FIGURA 3. Correção da Geometria no COMSOL.

por várias placas de circuito impresso distribuídas numa área grande, colocadas dentro de uma carcaça metálica (Figura 2). Kozhevnikov explica: "A única forma de identificar possíveis regiões de descarga autossustentada é a simulação numérica da descarga, mas isso é praticamente impossível em problemas de grande escala, devido aos respectivos custos computacionais. O problema de descarga é tanto multifísico quanto multiescalar."

⇒ **DETECÇÃO DE IMPRECISÕES GEOMÉTRICAS**

A equipe de pesquisa localizada em Tomsk trabalhou duro para descobrir uma abordagem computacional que fosse precisa e prática. Os pesquisadores propuseram uma metodologia de "decomposição" implementada com ferramentas computacionais para lidar com o problema. Em vez de fazer uma simulação de descarga de corrente contínua completa para o dispositivo eletrônico como um todo, eles criaram um aplicativo de simulação que autonomamente divide o dispositivo e faz a análise para encontrar as prováveis regiões críticas. Para isso eles usaram o software COMSOL Multiphysics® e o Application Builder para criar um modelo multifísico que sustentasse todo o processo de simulação.

Um passo importante da modelagem era o

pré-processamento, que era realizado para aplicar as condições de contorno adequadas e importar a geometria detalhada do sistema eletrônico de bordo real.

Com o Application Builder, a equipe fez o pré-processamento usando um método personalizado de macromodelo 3D. Eles também implementaram seu próprio mecanismo de importação com correção automática dos contornos dos objetos. O método executava tanto a importação quanto a correção automática das funcionalidades de contorno do objeto, explica Kozhevnikov (Figura 3). Sem a correção, estes erros poderiam se tornar obstáculos sérios na simulação.

⇒ **DESVENDANDO O PROBLEMA DAS FÍSICAS DO PLASMA**

Após o pré-processamento, a metodologia de modelagem era composta por 3 estágios: análise eletrostática preliminar das possíveis regiões críticas num modelo 3D; extração de áreas para melhoria do campo e definição das regiões críticas com os respectivos modelos 2D; e simulação de descargas CC das regiões críticas para investigar futuramente os parâmetros de interesse.

Inicialmente, a equipe usou o software COMSOL Multiphysics devido à sua capacidade única de implementar todas as características do modelo teórico

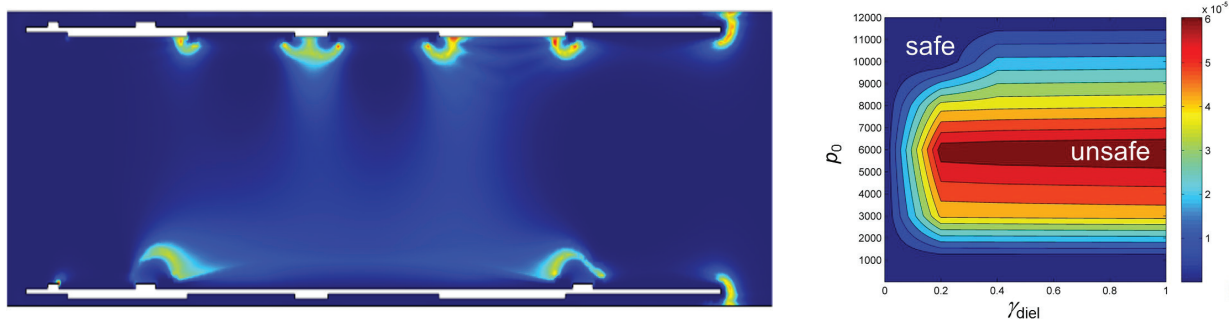
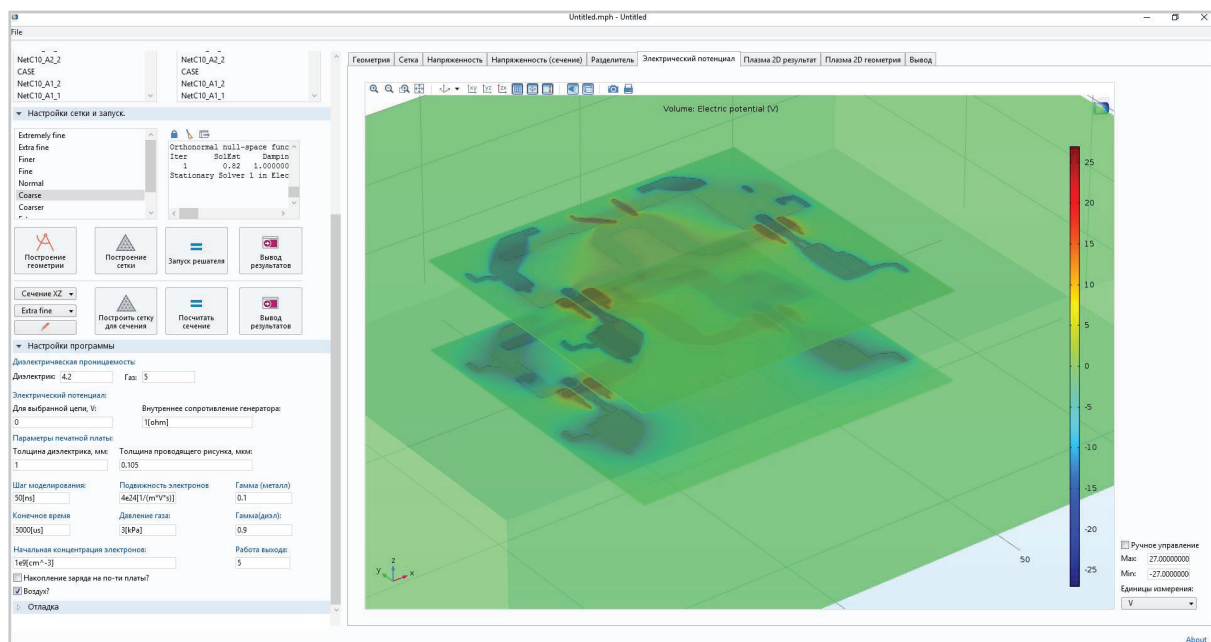


FIGURA 4. Esquerda: Distribuição de densidade de elétrons na fase de descarga autossustentada. Este modelo 2D é derivado das regiões críticas definidas a partir do modelo 3D da fonte de alimentação do satélite. Direita: Exemplo de diagrama de um parâmetro crítico que mostra a pressão de emissão de uma região crítica. O mapa de cores representa o nível de densidade da corrente de descarga.



**FIGURA 5.** O aplicativo multifísico que Kozhevnikov desenvolveu permite variar parâmetros como pressão e emissão de elétrons para procurar as regiões onde é mais provável que ocorra descarga autossustentada. O aplicativo combina o posicionamento do arco com a investigação de determinados regimes de ignição de descarga sem a simulação de descarga CC em escala real, e fornece resultados como o potencial elétrico pelo sistema do circuito.

de descarga de corrente contínua de dois momentos e alterar os parâmetros necessários. A simulação analisou a distribuição de densidade de elétrons e identificou a região crítica (Figura 4). Kozhevnikov explica: "O COMSOL Multiphysics atende de forma excelente aos requisitos de nosso projeto, ou seja, a análise da faixa de pressão operacional. Ele é muito mais rápido e mais conveniente que uma simulação particle-in-cell (PIC) para pressões médias e altas".

"As simulações PIC são simplesmente impraticáveis para tais problemas, devido aos altos custos computacionais. A simulação de configurações simplificadas (ex.: diodos de gás) é possível, mas dependendo do problema pode levar 5 a 20 vezes mais tempo, para pressões médias, que uma simulação do COMSOL. Para esta configuração, o tempo de computação médio no COMSOL é de menos de 2 horas."

O aplicativo personalizado que a equipe criou, mostrado na Figura 5, oculta a complexidade da física envolvida na preparação do modelo. Desta forma, o usuário do aplicativo pode focar somente nos parâmetros relevantes para a análise em questão e permite a inclusão de comandos e algoritmos personalizados.

Kozhevnikov comenta: "A rigor, o COMSOL permitiu realizar nossa pesquisa sem criar nosso próprio código

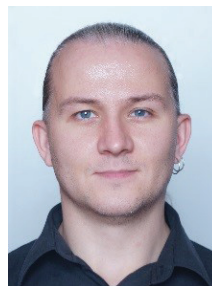
computacional, o que seria extremamente complicado considerando este problema. Esperamos que o software seja bastante promissor para nossas investigações futuras relacionadas a descargas de gás." Outros argumentos a favor da escolha do COMSOL foram sua ampla opção de ferramentas de pré- e pós-processamento, incluindo recursos de importação CAD e o Application Builder.

### ⇒ IMPLICAÇÕES ORBITAIS E INTERDISCIPLINARES

Existe a oportunidade de integrar tais simulações com investigações experimentais, explica Kozhevnikov. "Se for possível realizar testes totalmente não destrutivos no futuro, uma simulação no COMSOL estreitará a região de interesse de testes experimentais, excluindo partes não essenciais. Algum trabalho relacionado ao desenvolvimento de testes não destrutivos foi realizado por nossos colegas do Laboratório de Eletrônica no Vácuo do Instituto de Aparelhos Eletrônicos de Alta Corrente, no âmbito do projeto em que colaboramos."

"Dentro da indústria de naves especiais, a adaptabilidade do sistema de software automatizado

deve garantir seu uso contínuo", ele continua. "As normas da indústria aeroespacial mudam de tempos em tempos e, desta forma, é difícil considerar todas as consequências de tais mudanças. Nós resolvemos o problema de diagnóstico de arcos. Entretanto, esperamos que o aumento de tensão também exija reformulação substancial de alguns dispositivos eletrônicos de bordo, para atender às novas condições operacionais. De forma simples, se as condições operacionais de algum dispositivo estiverem significativamente diferentes das, condições normais, é necessário reconstruir sua arquitetura da maneira correta. Nosso aplicativo oferece recomendações de reprojeto para placas de circuitos impressos a fim de aumentar a resistência a arcos, mas também pode ser útil no projeto de sistemas eletrônicos tolerantes a falhas." ❖



Vasily Yu. Kozhevnikov obteve seu doutorado em Física Teórica pela Universidade Estadual de Tomsk, Tomsk, Rússia, em 2008. Desde 2008, ele é associado de pesquisa do Laboratory of Theoretical Physics of the Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk). Ele vem usando o COMSOL intensivamente desde 2012.

# A Simulação Transforma a Indústria de Equipamentos Médicos

por **FREDDY HANSEN, ABBOTT LABORATORIES**

Nós da indústria de equipamentos médicos nos esforçamos para exceder os limites da tecnologia para ajudar a aliviar a dor, recuperar a saúde e prolongar a vida. Há cinco anos, eu mudei de um laboratório nacional para o setor de dispositivos médicos. No momento, o único tipo de simulação realizada era de fluidodinâmica computacional (CFD). A simulação de implantes médicos é especialmente desafiadora, pois o corpo humano é um sistema de controle incrivelmente complexo e mal compreendido.

Ficou claro que a definição das condições de contorno para modelos numéricos podem ser diabolicamente difícil. Por exemplo, até mesmo criar um modelo térmico, que muitos de nós acreditamos ser um processo direto, pode ficar bastante complicado para um implante, devido à maneira como o calor é transportado em tecidos perfundidos. Outro obstáculo, é obter

“Recentemente, me deparei com exemplos em que os testes em bancada estabelecidos são consideravelmente menos precisos que simulações para prever o desempenho de um implante. Nestes casos, por que não simular?”

as propriedades corretas do material. Os músculos, gordura e outros tecidos do corpo podem apresentar propriedades espetacularmente estranhas e o material do dispositivo em si muda com o tempo, uma vez que ele está submetido a um ambiente hostil. Os metais corroem e os não metais absorvem fluidos e difundem estes líquidos e seus íons.

Se é tão difícil, por que simular? Felizmente, as vantagens da simulação computacional são significativas: tempo e dinheiro economizados na construção e teste de vários protótipos, além da capacidade de "medir" qualquer coisa, em qualquer lugar.

Para dar um exemplo específico sobre implantes médicos, uma parte muito dispendiosa do ciclo inclui os testes de dispositivos médicos. Apesar de certamente ser possível fazer medições nestes estudos, muitas vezes não é possível posicionar as sondas de vazão, termopares e outros sensores exatamente no local desejado. A simulação nos ajuda a planejar e nos preparar para estes estudos. O uso desta tecnologia nos permitiu realizar a interpolação entre dados experimentais coletados em locais diferentes, resultando numa análise mais sofisticada. Enfim, fomos capazes de reduzir o número de testes necessários. Em determinadas situações, é possível abrir mão completamente de um estudo, a favor de simulação.

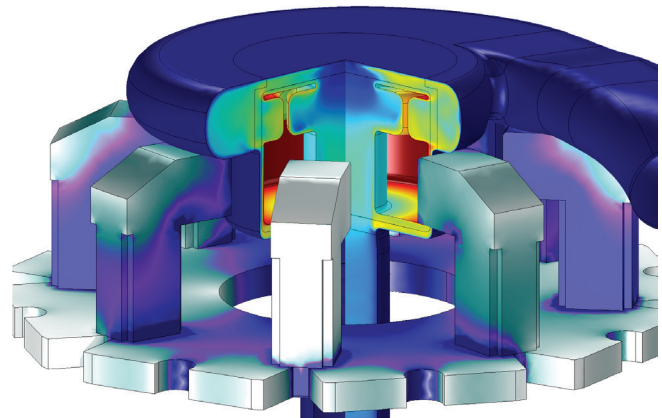
Tem sido encorajador ver a tendência atual entre órgãos reguladores pelo mundo caminhando na direção de uma maior aceitação de simulações no lugar de testes no processo regulatório de aprovação.

Frequentemente, testes em bancada menos dispendiosos

também podem ser substituídos por simulação. Recentemente, me deparei com exemplos em que os testes de bancada estabelecidos são consideravelmente menos precisos que simulações para prever o desempenho de um implante. Nestes casos, por que não simular?

Os softwares de simulação melhoraram com o passar dos anos. Particularmente, eu gosto do COMSOL devido aos seus recursos multifísicos incomparáveis. Mesmo quando não estou estudando físicas acoplada, o uso da mesma interface para modelar a transferência de calor, eletromagnetismo, mecânica estrutural ou CFD acelera o fluxo de trabalho e reduz os erros. Eu também preciso ser capaz de inserir propriedades de materiais arbitrariamente complexas ou minhas próprias EDOs e EDPs conforme necessário, e acoplá-las perfeitamente à física predefinida.

A simulação computacional tem muito a oferecer ao setor de dispositivos médicos e eu tenho o prazer de observar a demanda e apreciação pela simulação computacional aumentar constantemente nos últimos anos, tanto na minha empresa como no setor como um todo.



Dispositivo de Assistência Ventricular Esquerdo (LVAD) simulado no software COMSOL Multiphysics®.



## SOBRE O AUTOR

Freddy Hansen é Doutor em Física Aplicada pela Caltech. Ele vive na área da baía de São Francisco e trabalha para a empresa Abbott Laboratories, usando sua experiência em eletromagnetismo e dinâmica dos fluidos para projetar corações artificiais. Ele publicou mais de 40 trabalhos de pesquisa, tem meia dúzia de patentes, pendentes ou aprovadas, e é o coautor de um livro didático de física universitário.