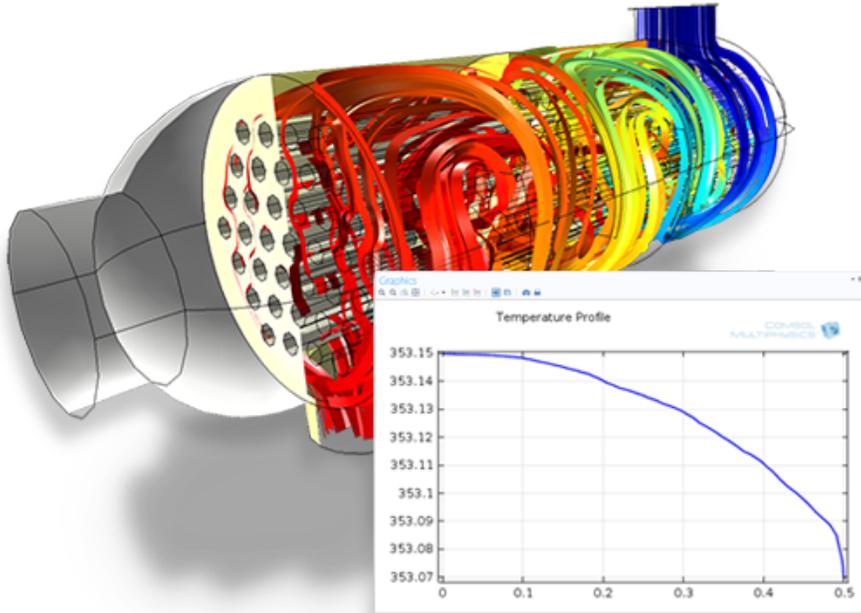


# Heat Transfer Module

Software Para a Modelagem Geral de Transferência de Calor em Sólidos e Fluidos



*Perfil de temperatura no lado da casca e ao longo de um dos tubos em um trocador de calor.*

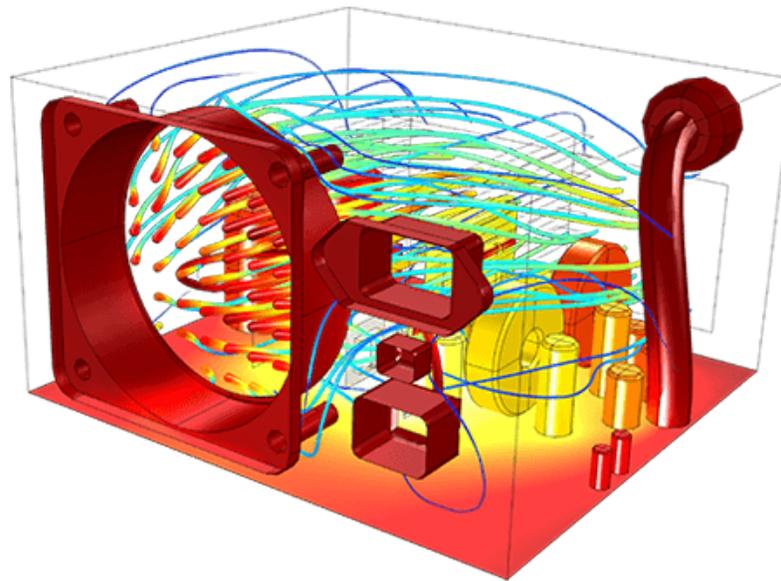
## A Geração, Absorção e Transferência de Calor

O *Heat Transfer Module* ajuda a investigar os efeitos de aquecimento e resfriamento em dispositivos, componentes ou processos. O módulo oferece ferramentas de simulação para estudar mecanismos de transferência de calor - condução, convecção e radiação - frequentemente em conjunto com outras físicas, como mecânica estrutural, dinâmica dos fluidos, eletromagnetismo e reações químicas. Nesse contexto, o *Heat Transfer Module* atua como uma plataforma para todas as indústrias e aplicações possíveis onde a geração, absorção ou transferência de calor ou energia sejam o foco do processo estudado, ou contribuam significativamente para o estudo.

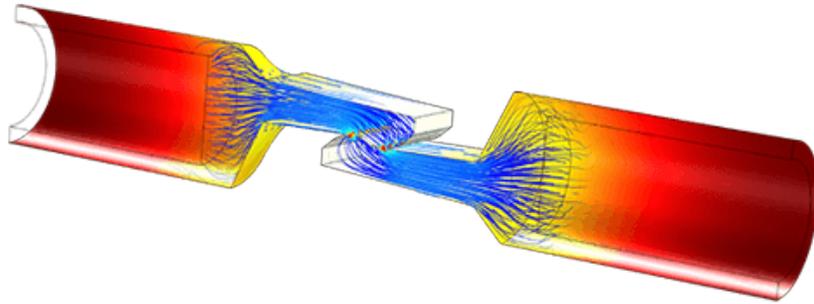
## Dados Termodinâmicos e de Materiais

O Heat Transfer Module vem equipado com um banco de dados de materiais interno que contém as propriedades de diversos fluidos e gases comuns, o que inclui muitos dos dados termodinâmicos necessários para uma análise precisa. Eles incluem condutividade térmica, capacidade térmica e densidade. A [Material Library](#) também é uma fonte para propriedades de material, com os dados ou relações algébricas de mais de 2.500 materiais sólidos, onde muitas dessas propriedades, como o módulo de Young e a condutividade elétrica, dependem da temperatura. O Heat Transfer Module também suporta a importação de dados termodinâmicos ou de outros dados de materiais a partir do Excel® e do MATLAB® e a conexão com bancos de dados de termodinâmica externos através do padrão de interface CAPE-OPEN.

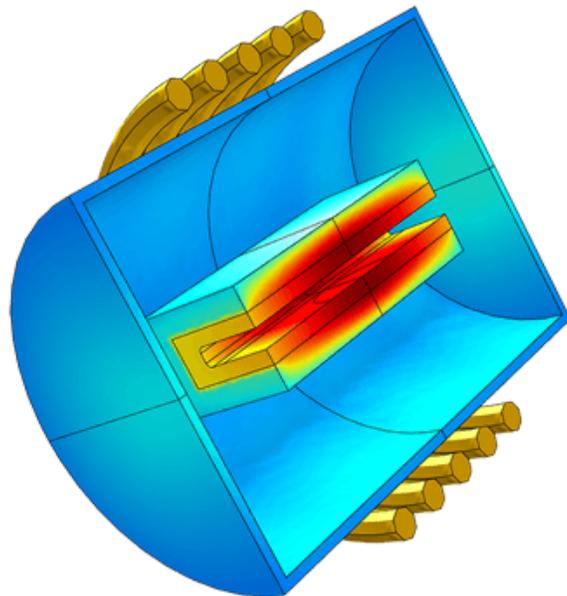
### Imagens adicionais:



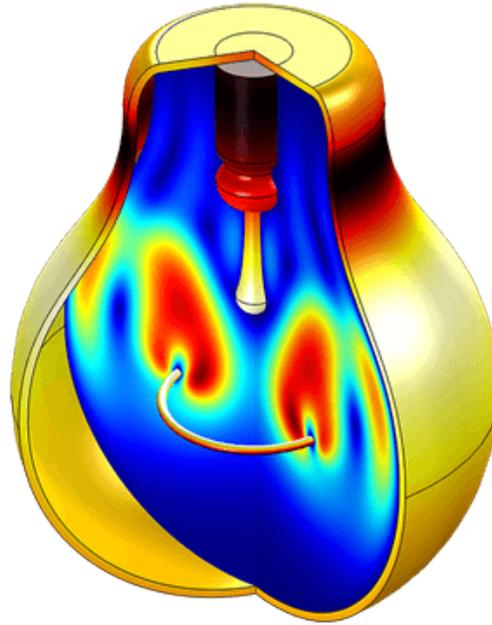
*Transferência de calor conjugada: Uma ventoinha e uma grade perfurada induzem um escoamento de ar dentro do invólucro da fonte de alimentação de um computador para amenizar o aquecimento interno.*



*Contato térmico: A corrente elétrica produz aquecimento por efeito Joule em uma chave de contato. As resistências térmica e elétrica no ponto dos contatos são acopladas à pressão de contato mecânica na interface.*



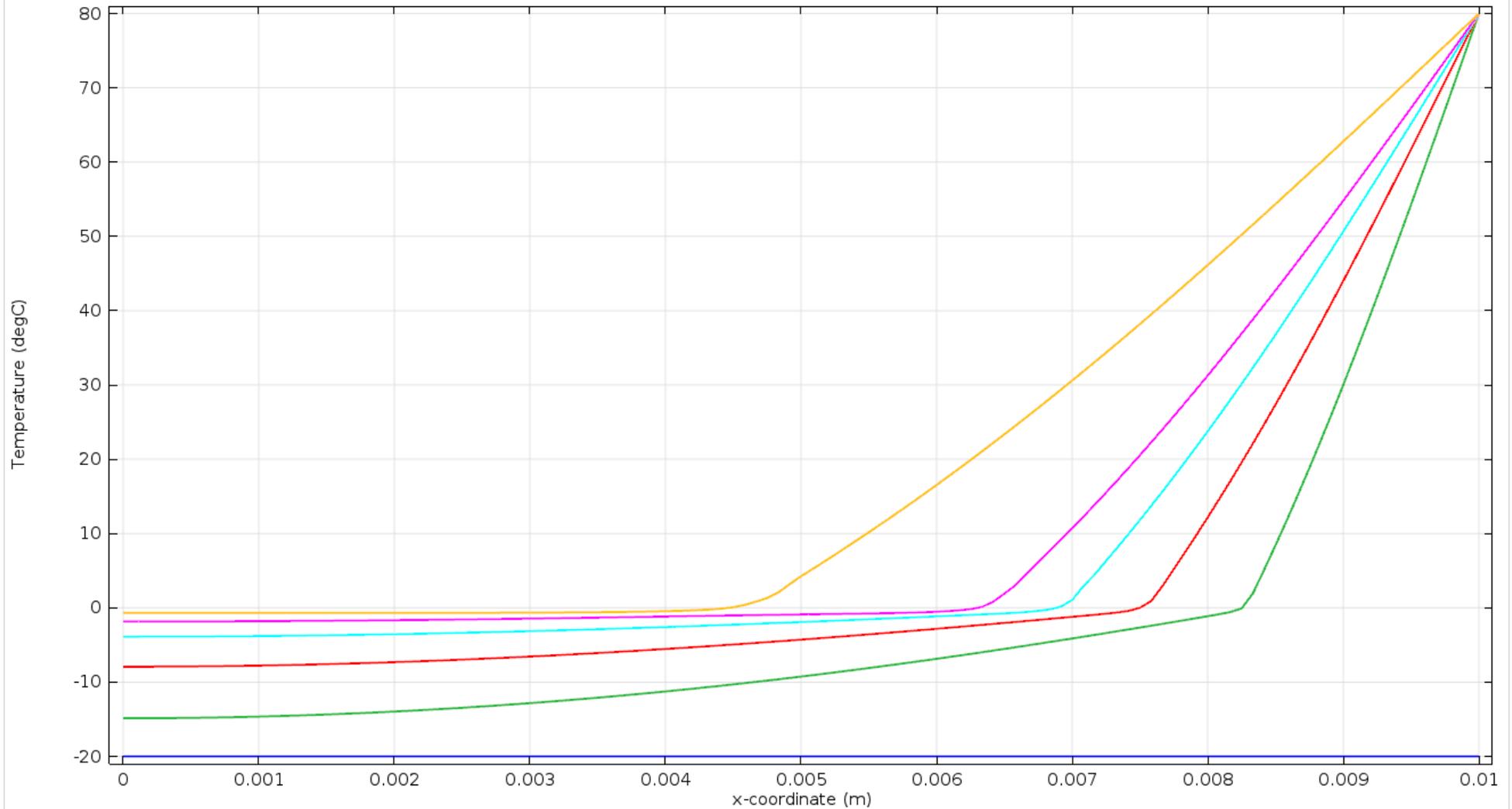
*Aquecimento por indução: A criação de altas temperaturas em um forno de parede quente para fabricação de semicondutores é obtida através de aquecimento por indução. A radiação de superfície para superfície entre o wafer e as paredes do forno, bem como a condução e convecção, são levadas em conta.*



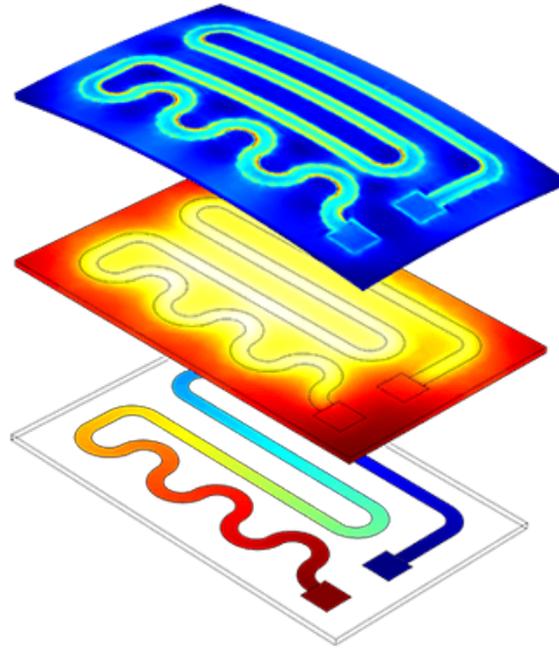
*Radiação: A convecção livre do gás argônio ocorre através de variações na densidade causadas por diferenciais de temperatura. Eles são causados pelo acoplamento da radiação de calor com a transferência de calor por condução e convecção.*



Line Graph: Temperature (degC)



Mudança de fase: Uma haste de gelo é mantida congelada em uma extremidade e a 80°C na outra. O gráfico indica seu perfil de temperatura por um período de tempo levando em conta o calor latente e a diferença entre propriedades sólidas e materiais, como condutividade e capacidade térmica.



*Camadas finas: A simulação de um circuito de aquecimento que inclui aquecimento por efeito Joule induzido por corrente contínua, transferência de calor e análise da mecânica estrutural da camada resistiva fina em uma placa de vidro sólida.*

## Um Fluxo de Trabalho Unificado

O Heat Transfer Module é excepcional para o mundo da modelagem porque é uma ferramenta dedicada para simular efeitos térmicos em seus processos de fabricação e projetos de produto. A COMSOL adota uma abordagem unificada tanto para a definição dos modelos quanto para a operação de suas simulações de transferência de calor e de todos os outros fenômenos físicos envolvidos em suas aplicações. Você ganha, portanto, uma ferramenta padrão para se comunicar com outros engenheiros e departamentos de engenharia que analisam fenômenos diferentes dos seus. Independentemente de em quais físicas você ou seus colegas estão trabalhando dentro de uma aplicação específica, seu fluxo de trabalho é uniforme e direto, e ocorre de acordo com o seguinte:

- Importar ou desenhar a geometria do dispositivo ou sistema em questão
- Selecionar dados ou relações de materiais a partir dos mesmos arquivos usando propriedades constantes ou que dependem da temperatura
- Decidir a melhor descrição da transferência de calor de seu sistema a partir de uma gama de interfaces sob medida que podem ou não depender de outras físicas acopladas a seu sistema
- Incluir quaisquer outros efeitos físicos acoplados aos efeitos da transferência de calor
- Definir condições e restrições nos contornos de seu sistema
- Criar a malha de seu sistema e, em seguida, usar essa malha ou malhas derivadas desta em diferentes simulações
- Executar os processos de resolução, com um método de resolução e configurações adequados para a análise sendo realizada
- Processar e visualizar seus resultados e apresentá-los nos mesmos gráficos e figuras ainda que eles sejam de simulações diferentes

## Plataforma Unificada Para Simular Efeitos Térmicos Sobre processos de Fabricação e Projetos de Produto

Junto com o COMSOL Multiphysics e a numerosa quantidade de módulos complementares, a COMSOL oferece uma ferramenta unificada para todas as facetas de seus processos e projetos, independentemente dos fenômenos físicos que esteja estudando. Você pode modelar o aquecimento por efeito Joule dos dispositivos em seu sistema um dia, modelar o resfriamento destes passando ar através de seu sistema no outro e modelar as tensões térmicas a que seus dispositivos estão sujeitos no dia seguinte a este. Ou então pode modelar todos os efeitos de uma só vez.

A transferência de calor é um efeito físico importante, que é, na maioria das vezes, levado em conta junto com outros efeitos físicos. Campos de temperatura geram tensões térmicas, ao passo que campos eletromagnéticos criam aquecimento resistivo, por indução, por micro-ondas e por radiofrequência. O escoamento sobre diferentes componentes e peças é essencial para resfriá-los, ao passo que variações na temperatura têm um impacto gigantesco sobre as propriedades materiais e seu comportamento físico quando eles estão sendo processados termicamente, como por fundição ou soldagem. O Heat Transfer Module inclui diversas interfaces do usuário para a fácil modelagem da transferência de calor acoplada a outros fenômenos e pode ser integrado a qualquer um dos outros módulos da Linha de Produtos COMSOL®.

### Os Mecanismos da Transferência de Calor

Essencial para o *Heat Transfer Module* é a possibilidade de realizar cálculos referentes à conservação de calor, ou balanços de energia, onde vários fenômenos, como perdas mecânicas, calores latentes, aquecimento por efeito Joule ou calor de reação, estão disponíveis. O *Heat Transfer Module* inclui interfaces prontas, conhecidas como interfaces físicas, configuradas para receber entradas de modelo pela interface gráfica do usuário (GUI) e para usar essas entradas para formular seus balanços de energia. Como ocorre com todas as interfaces físicas na Linha de Produtos COMSOL, você pode manipular as equações para proporcionar flexibilidade para modificar mecanismos de transferência, definir fontes de calor específicas ou acoplar outras físicas.

#### Condução

O *Heat Transfer Module* ajuda você a investigar os efeitos do aquecimento e resfriamento em dispositivos, componentes ou processos. O software fornece à você ferramentas para estudar os mecanismos de transferência de calor - condução, convecção e radiação - frequentemente em colaboração com outras físicas, como mecânica estrutural, fluidodinâmica, eletromagnetismo e reações químicas. Neste contexto, o *Heat Transfer Module* age como uma plataforma para todas as possíveis indústrias e aplicações, onde geração, absorção ou transferência de calor, ou energia, é o foco, ou contribuem significativamente no processo estudado.

#### Radiação

É oferecido suporte para modelar a radiação para diversos cenários no Heat Transfer Module, o que inclui métodos de resolução especializados para modelar o fenômeno e acoplá-lo à convecção e à condução. O Heat Transfer Module oferece ferramentas para modelar a radiação da superfície para o ambiente, do ambiente para a superfície e de superfície para superfície em meios transparentes, opacos e participantes.

O módulo usa o método da radiosidade para modelar a radiação de superfície para superfície e leva em conta propriedades de superfície que dependem do comprimento de onda onde você pode considerar simultaneamente até cinco bandas espectrais no mesmo modelo. Isso é apropriado para modelar a radiação solar, onde a absorvidade da superfície para comprimentos de onda curtos (banda espectral solar) pode diferir da emissividade da superfície para

comprimentos de onda mais longos (banda espectral ambiente). Além disso, é possível definir propriedades de transparência para cada banda espectral. O Heat Transfer Module também modela a transferência de calor por radiação em meios participantes, o que leva em conta a absorção, a emissão e o espalhamento da radiação de calor nos referidos meios.

## **Convecção**

A presença de fluidos em seus sistemas introduz invariavelmente convecção a suas aplicações de transferência de calor e contribuições de energia, através da atuação da pressão e de efeitos viscosos. O Heat Transfer Module suporta facilmente esses processos e leva em conta tanto a convecção forçada quanto a convecção livre ou natural. Ele inclui uma interface física específica para transferência de calor conjugada, onde materiais sólidos e fluidos são moldados no mesmo sistema. Para levar em conta o escoamento, o Heat Transfer Module contém interfaces físicas para modelar o escoamento laminar e o escoamento turbulento usando modelos de turbulência para altos números de Reynolds e modelo k-ε para baixos números de Reynolds. Em todos os casos de escoamento, os efeitos de flutuação natural que ocorrem devido a diferenças na temperatura são respeitados assumindo-se o escoamento não isotérmico. A integração de seus modelos de transferência de calor com o [CFD Module](#) permite outras simulações de escoamento, incluindo diferentes modelos de turbulência, escoamento em meios porosos e escoamento bifásico.

Além disso, o Heat Transfer Module inclui recursos para simplificar a modelagem da convecção quando a modelagem completa da dinâmica de fluidos não proporcionar precisão extra ou for computacionalmente inviável. Os recursos estão à disposição através de uma biblioteca integrada de coeficientes de transferência de calor e podem ser usados para simular a transferência de calor entre os meios adjacentes e seus contornos através da convecção forçada ou natural. O módulo também contém modelos para diferentes tipos de configurações geométricas, como chaminés ou placas (verticais, inclinadas ou horizontais) e diferentes fluidos externos (ar, água e óleo).

## **Transferência de Calor em Meios Porosos**

Embora os conceitos de transferência de calor para escoamentos laminares e turbulentos em meios livres sejam relativamente familiares, o Heat Transfer Module também possui interfaces robustas para modelar a transferência de calor em meios porosos, considerando a condução e a convecção, nas fases sólidas e nos poros abertos da matriz porosa. Pode-se selecionar diferentes modelos de média para definir propriedades de transferência de calor eficazes que são automaticamente calculadas a partir das respectivas propriedades dos materiais sólidos e fluidos. Pode-se também acessar um recurso predefinido para a dispersão de calor em meios porosos causada pela via tortuosa percorrida pelos fluidos através dos poros.

## **Aquecimento biológico**

Uma interface física para a equação biotérmica é incluída no *Heat Transfer Module*. A interface *Bioheat Equation* é a ferramenta perfeita para simular efeitos térmicos no tecido humano e em outros sistemas biológicos, seja através do aquecimento por micro-ondas, do aquecimento resistivo, do aquecimento por reação química ou do aquecimento radiativo. Como sempre, no ambiente COMSOL, mudanças na temperatura podem ser facilmente direcionadas de volta às propriedades de material de outras físicas, como propriedades elétricas no caso de uma simulação multifísica fortemente acoplada. O bioaquecimento pode ser combinado a uma variedade de fenômenos de mudança de fase, incluindo a necrose de tecidos.

## **Mudança de fase**

A mudança de fase é uma propriedade descontínua na análise da transferência de calor. Ela pode introduzir transformações difíceis de prever como a interface geométrica entre duas fases, ou mudanças repentinas em propriedades de material, como a condutividade, a capacidade térmica ou o comportamento do escoamento, que podem variar em algumas ordens de grandeza entre as fases sólida, líquida e gasosa do material. A mudança de fase também introduz calores latentes, o que predomina em muitos balanços de calor. Graças a uma variedade de diferentes recursos e interfaces do usuário, o COMSOL Multiphysics e o Heat Transfer Module são capazes de levar em conta essas perturbações, incluindo a possibilidade de modelar mudanças de volume usando malhas móveis. Também é suportada a definição automática de propriedades termodinâmicas para levar em conta mudanças repentinas em propriedades materiais e ainda assim permitir a continuidade através do controle do intervalo entre mudanças de fase.

### **Resistência Térmica de Contato**

Quando dois objetos sólidos estão conectados um ao outro, a resistência à transferência de calor geralmente se dá em função do quanto eles estão pressionados um contra o outro e de suas respectivas irregularidades de superfície. A irregularidade cria pequenas lacunas entre as superfícies, o que inibe a transferência de calor, ao passo que pressionar essas superfícies diminui o tamanho das lacunas. No Heat Transfer Module, são incluídas interfaces físicas para simular o coeficiente de condução de calor do contato, que depende da tensão aplicada, da condutividade específica na lacuna e que também leva em conta a contribuição da radiação de superfície para superfície entre superfícies separadas por lacunas pequenas. A integração de seus modelos de transferência de calor com o [Structural Mechanics Module](#) possibilita o acoplamento direto entre os aspectos térmicos e mecânicos do contato, incluindo a expansão térmica.

### **Camadas Finas e Cascas**

Seus dispositivos ou processos geralmente serão compostos por materiais ou domínios geometricamente muito menores do que o restante do sistema. Exemplos disso incluem finas camadas de cobre em placas de circuito impresso, a parede de um vaso de pressão ou camadas isolantes finas. Ferramentas de modelagem especializadas disponíveis no Heat Transfer Module simulam essas características e economizam recursos computacionais. Cascas altamente condutoras são usadas em situações onde o gradiente de transferência de calor é significativo nas direções tangenciais de uma camada ou casca, mas não ao longo de sua espessura, evitando assim a necessidade de criar malha sobre a largura dessa camada ou casca. No entanto, elas acoplam os resultados de suas soluções às entidades 3D, às quais a camada ou casca se conecta. Elas poderiam ser uma parede fina entre dois domínios maiores, um domínio e seus arredores ou uma camada embutida na superfície de outro sólido. À semelhança, interfaces físicas para camadas finas termicamente resistivas oferecem uma maneira fácil de representar materiais mal condutores.

### **O nó Multifísico Thermoelectric Effect**

Materiais que apresentam o efeito termoelétrico são capazes de converter diferenças de temperatura em tensões elétricas uma vez que o fluxo de calor contém portadores de carga. Alternativamente, aplicando-se uma tensão elétrica nestes materiais resulta em um gradiente de temperaturas através do material. Componentes feitos de materiais termoelétricos são usados frequentemente em resfriamento de componentes eletrônicos e refrigeradores portáteis, bem como no aproveitamento termoelétrico de energia.

A interface multifísica *Thermoelectric Effect* é uma combinação das interfaces *Electric Currents* e *Heat Transfer in Solids*. É possível ter acesso a toda a gama de funcionalidades do *Heat Transfer Module*, como as condições de contorno avançadas e radiação. Do mesmo modo que todas as outras interfaces físicas contidas no COMSOL, a interface *Thermoelectric Effect* pode ser acoplada a qualquer uma das outras interfaces físicas, tal como a interface *Solid Mechanics*, por exemplo. Propriedades de dois materiais termoelétricos comuns estão disponíveis: Telureto de Bismuto e Telureto de Chumbo. Além disso, pode-se acrescentar facilmente materiais termoelétricos definidos pelo usuário.