



AMBIENTE COMPUTACIONAL INTERATIVO PARA ANÁLISE DE PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Marcos V. R. Silveira – mvrattis@hotmail.com

Programa Especial de Treinamento – PET/SESu – Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Francisco J. Gomes – chico@jfnet.com.br

Departamento de Energia – Faculdade de Engenharia – Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Resumo: *O ambiente consiste de aplicativo desenvolvido para analisar e visualizar processos térmicos de aquecimento e resfriamento de sólidos, constituindo ferramenta computacional de grande utilidade didática para suporte a disciplinas que envolvam aspectos relacionados à transferência de calor. Possui ferramentas integradas para visualização de processos estacionários e transientes de distribuição de temperatura. O ambiente dispõe ainda de biblioteca com distintos tipos de materiais, com as respectivas propriedades físicas, que pode ser utilizada para consulta rápida ou para estudos diferenciados dos fenômenos térmicos em cada tipo de material. Apresentando interface amigável e com navegação fácil, o ambiente constitui importante e útil ferramenta de suporte didático, podendo ser utilizado por professores, alunos e operadores industriais, facilitando o aprendizado dos fenômenos de transporte de energia.*

Palavras chave: *Transferência de calor, Fenômenos de transporte, Simulação*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das ferramentas computacionais de alto desempenho, aliada à crescente capacidade de processamento dos computadores tem funcionado como suporte não só para o desenvolvimento de projetos de engenharia, mas tem influenciado, de forma positiva a área de ensino de engenharia. Dentre outras implicações, destaca-se o fato que situações cujas soluções são baseadas em procedimentos analíticos, de operacionalização complexa, por vezes impraticáveis, tornam-se não só possíveis, mas passam a dispor de suportes didáticos até então inimagináveis. Disciplinas como termodinâmica e fenômenos de transporte, básicas para qualquer engenharia, podem ser listadas com exemplos desta situação: a solução de problemas reais, pode até ser solucionados sem suporte computacional, mas dificilmente poderão ser solucionados, analisados e devidamente compreendidos sem o auxílio de ambientes digitais específicos. Apesar destas evidências, não são disponíveis, para uso extensivo em curso de formação e treinamento, ambientes específicos para solução e análise de processos de transferência de calor, com enfoque didático, que sejam acessíveis à maioria dos estudantes universitários.

No intuito de atender de forma direta os problemas relacionados à solução, simulação, análise e visualização de processos envolvendo fenômenos de transporte de energia, desenvolveu-se o presente trabalho, que consiste em um ambiente computacional interativo e amigável, para análise de processos de transferência de calor. O trabalho desenvolvido permite solucionar e analisar processos térmicos de aquecimento e resfriamento de sólidos, constituindo ferramenta computacional de grande utilidade didática para suporte a disciplinas como Física, Termodinâmica e Fenômenos de Transporte. Pode ser utilizado, adicionalmente,

para aplicações práticas em ambientes industriais que envolvam processos de tratamento térmico, metalúrgicos e siderúrgicos.

O trabalho está estruturado como segue: a seção 2 apresenta o ambiente desenvolvido, com suas funcionalidades, a seção 3 mostra os resultados obtidos e a seção 4 encerra o texto, com discussão das considerações finais.

2. O AMBIENTE

Esta seção trata da estruturação e dinâmica do ambiente. São destacadas, primeiramente suas principais aplicabilidades, os procedimentos para escolha dos processos a serem analisados, com definição dos parâmetros associados. Destacam-se, na seqüência, as interfaces gráficas, com visualização das soluções desenvolvidas bem como suas principais funcionalidades.

2.1 Ferramentas integradas ao ambiente

O processo de desenvolvimento do ambiente procurou incluir ferramentas que forneçam suporte a problemas de aplicabilidade geral na área de transferência de calor e que requerem auxílio computacional para solução e principalmente para análise e visualização dos resultados numéricos encontrados. Como resultado deste enfoque, o ambiente desenvolvido permite solucionar, visualizar e analisar as seguintes situações:

- Distribuição de temperatura em estado permanente, para superfície retangular bidimensional, com condições de contorno uniformes por partes (uma temperatura definida em cada face);
- Transiente de resfriamento e aquecimento de sólidos unidimensionais e bidimensionais, com condições de contorno uniformes, envolvendo convecção e irradiação combinadas.

O ambiente dispõe ainda de biblioteca com distintos tipos de materiais, com as respectivas propriedades físicas, que pode ser utilizada para consulta rápida ou para estudos diferenciados dos fenômenos térmicos em cada tipo de material. Serão analisadas, a seguir, as situações propostas e solucionadas pelo ambiente.

Análise de distribuição estacionária de temperatura

Este caso corresponde a situações que, na prática, ocorrem quando a superfície de um sólido possui interface com um sistema térmico de grande inércia térmica, por exemplo, uma coluna de sustentação com uma de suas faces laterais em contato com um grande forno industrial e que tem suas superfícies laterais mantidas em temperaturas aproximadamente constantes. As dimensões do sólido, em forma de prisma retangular, são tais que o efeito da condução de calor é significativo apenas em duas direções. Isso equivale, no caso do exemplo citado, a admitir que a altura da coluna de sustentação é bem maior que as dimensões de seu perfil e, portanto o fluxo térmico na direção vertical pode ser desprezado.

A modelagem matemática deste problema foi efetuada mediante balanço energético e utilização de equações diferenciais parciais envolvendo duas variáveis espaciais. A solução é obtida empregando técnicas de discretização e aplicando métodos analíticos conhecidos, cuja base pode ser vista em INCROPERA e DEWITT (1998).

Análise transiente de aquecimento e resfriamento

Os processos de aquecimento e resfriamento de sólidos são procedimentos comuns em diversas aplicações industriais, especialmente na área de engenharia de materiais tais como processos de tratamento térmico, resfriamento rápido por imersão em líquido, resfriamento por circulação forçada de corrente de ar outros. Para a maioria dos casos, efeitos

multidimensionais de transferência de calor estão envolvidos, e a análise não pode ser feita mediante métodos analíticos convencionais.

Esta segunda situação proposta pelo ambiente permite avaliar a evolução temporal do gradiente térmico ao longo de um prisma retangular ou cilíndrico, com condições de contorno uniformes, podendo envolver convecção e irradiação combinadas.

Para este segundo caso, a modelagem do problema utilizou equações diferenciais parciais envolvendo duas variáveis espaciais e uma variável temporal. A solução foi obtida por técnicas de discretização do espaço e do tempo e aplicando métodos numéricos computacionais específicos, BUCHANAN (1992). As condições de contorno são determinadas por escolha direta dos parâmetros ou a partir de condições disponibilizadas no ambiente, em alguns casos utilizando parâmetros estimados, conforme proposto por INCROPERA e DEWITT (1998).

Biblioteca de materiais

Dentre as funcionalidades apresentadas pelo ambiente desenvolvido, deve ser destacado o fato que o ambiente disponibiliza uma biblioteca de materiais diversos, mais comumente utilizados na prática, com os parâmetros necessários às simulações. A figura 1 apresenta a tela de interface para escolha e consulta das propriedades dos materiais, ilustrando duas situações possíveis.

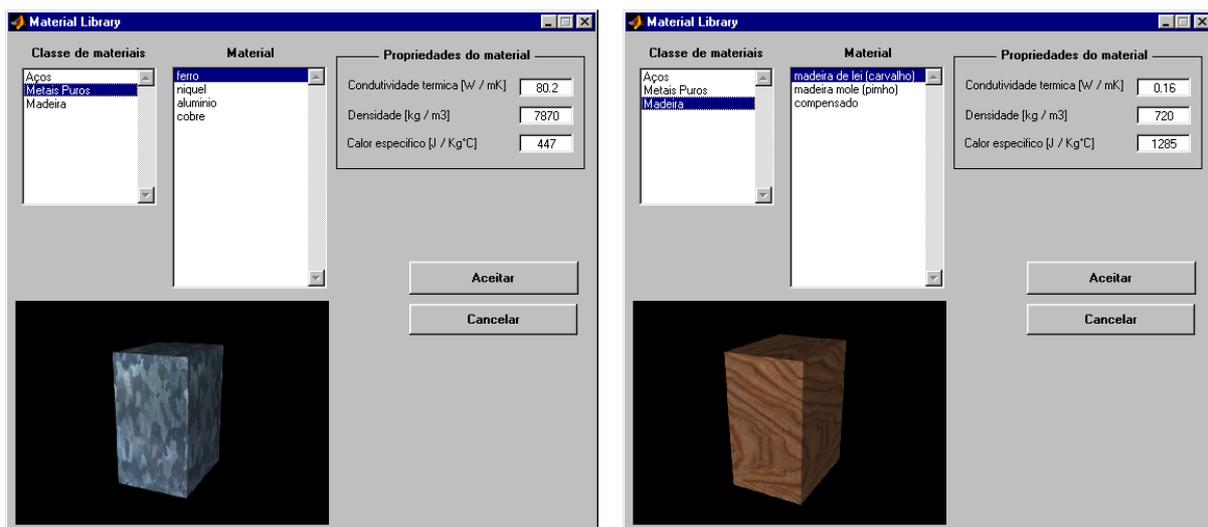


Figura 1 – Biblioteca de materiais, com duas situações de escolha

2.2 Dinâmica de escolha dos processos e definição dos parâmetros associados

A tela inicial do ambiente é mostrada na “Figura 2”, nela estão dispostos objetos que descrevem a situação em análise e determinam diretamente como a solução será processada. Para simulação de um caso determinado, o usuário deve inicialmente ajustar alguns parâmetros, incluindo o tipo de análise e parâmetros correspondentes, só então a dinâmica do processo pode ser simulada. Para definir os parâmetros de um determinado problema o usuário deve acionar “alterar parâmetros”, esta opção abre uma janela integrada ao ambiente que permite realizar a escolha dos parâmetros de simulação. A cada tipo de análise corresponde um conjunto de parâmetros, assim duas janelas de configuração de parâmetros estão integradas ao ambiente.

A “Figura 3” apresenta a janela de escolha dos parâmetros para análise de distribuição estacionária de temperatura e a “Figura 4” mostra a janela de definição dos parâmetros para análise transiente de aquecimento e resfriamento.

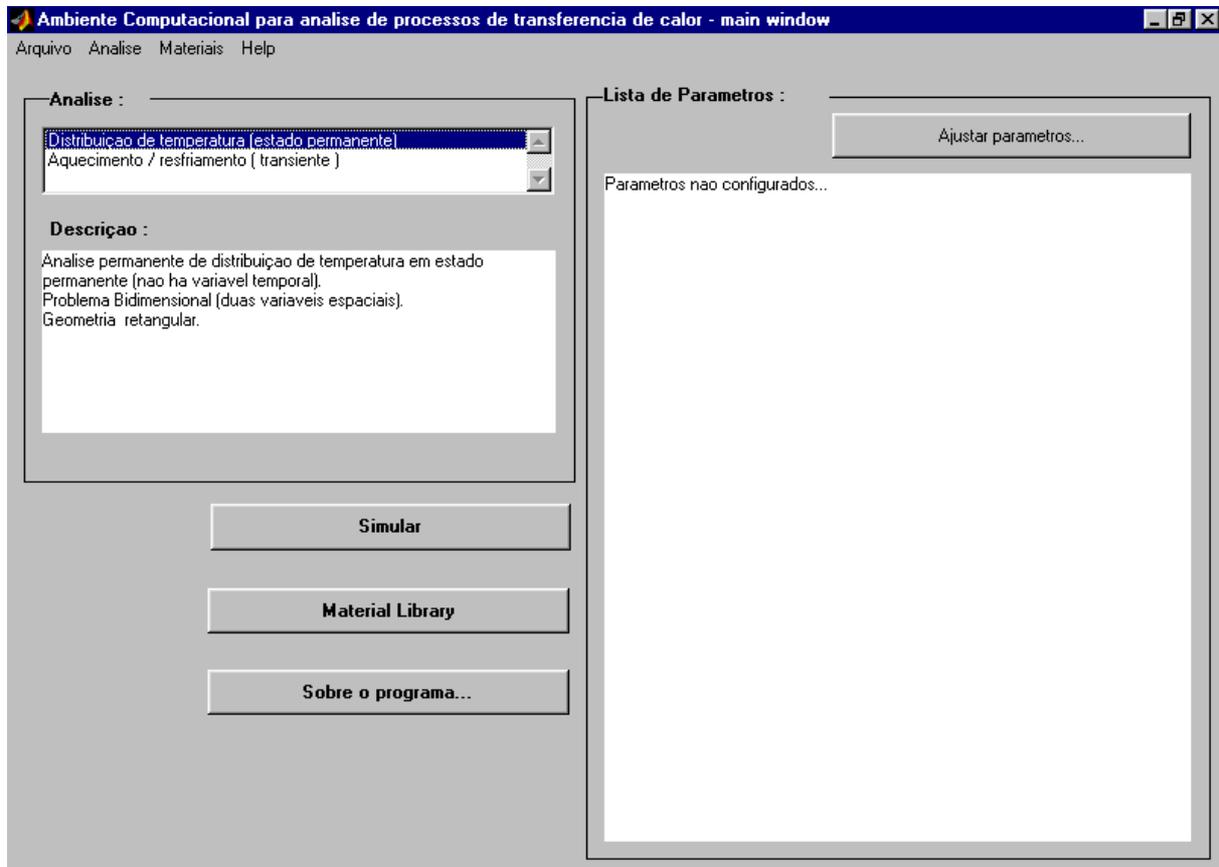


Figura 2 – Tela principal do ambiente

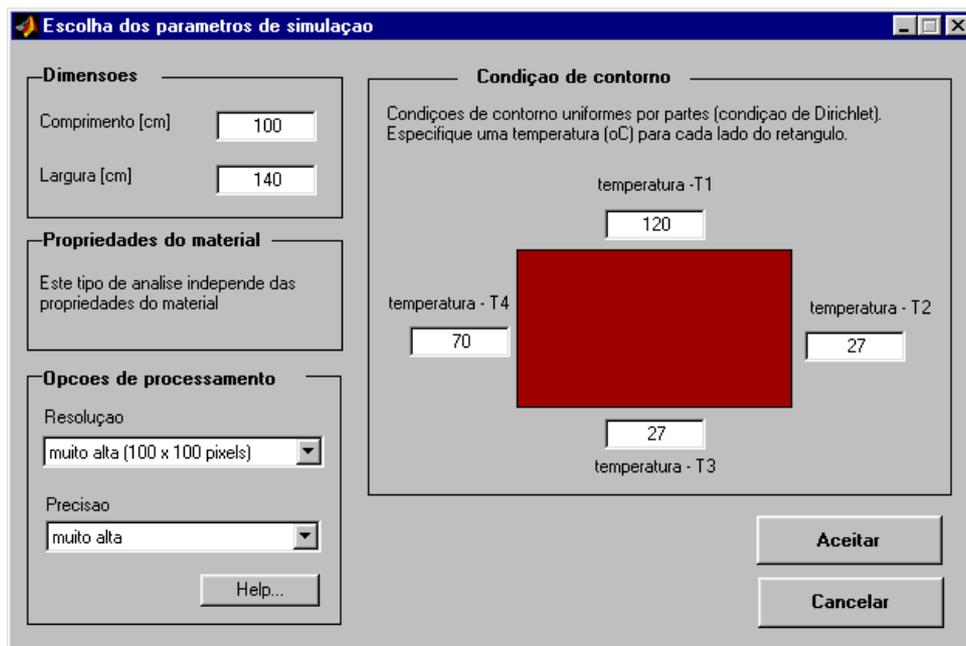


Figura 3 – Definição de parâmetros: análise de distribuição estacionária de temperatura

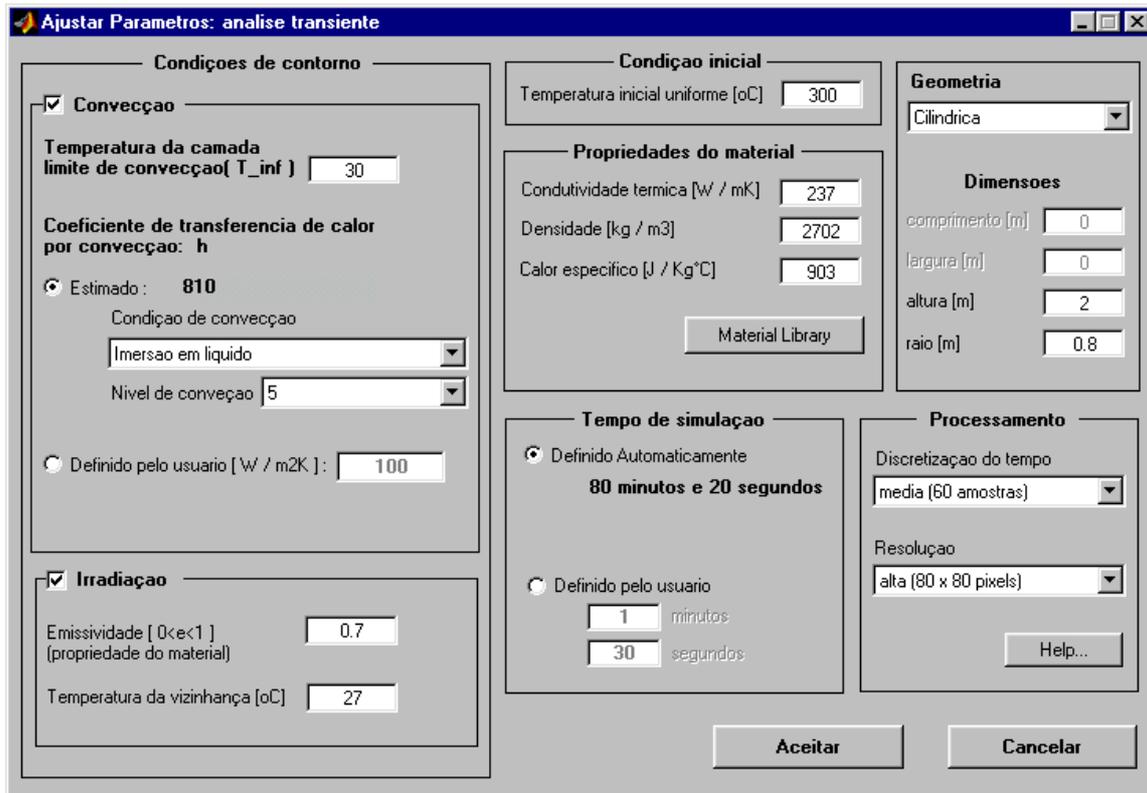


Figura 4 – Definição de parâmetros: análise transiente de aquecimento e resfriamento

2.3 Ambientes para visualização e análise dos resultados

Um dos principais aspectos no ensino dos processos de transferência de calor, para um aprendizado eficiente, adicionalmente aos procedimentos analíticos e computacionais necessários à obtenção das soluções, é a possibilidade de se interpretar e entender corretamente os resultados e dinâmicas correspondentes, que pode ser colocado como o mais importante diferencial do presente trabalho. Associado a cada uma das condições de análise citadas na seção anteriores, há um ambiente específico para visualização da solução e diversas funcionalidades que permitem interpretar e analisar os resultados obtidos. Esta seção discute os ambientes gráficos de apresentação e análise dos resultados obtidos para os problemas simulados, bem como diversas funcionalidades associadas que permitem ao usuário investigar aspectos relacionados ao transporte de calor.

Visualização dos resultados para a análise de distribuição estacionária de temperatura

A solução do problema de distribuição estacionária de temperatura fornece uma matriz térmica de dimensão igual à resolução escolhida para a imagem. Seja uma situação concreta onde uma superfície superior de um material, por exemplo, o suporte de um forno, é mantido em alta temperatura (200°C), enquanto as demais superfícies estão à temperatura ambiente (27°C). O ambiente, após calcular a distribuição estacionária de temperaturas, apresenta esta distribuição no interior da geometria “Figura 5”, mapeada por cores, associadas a uma escala de temperaturas definida automaticamente. Esta correspondência constitui mais uma das funcionalidades do ambiente “Figura 6”.

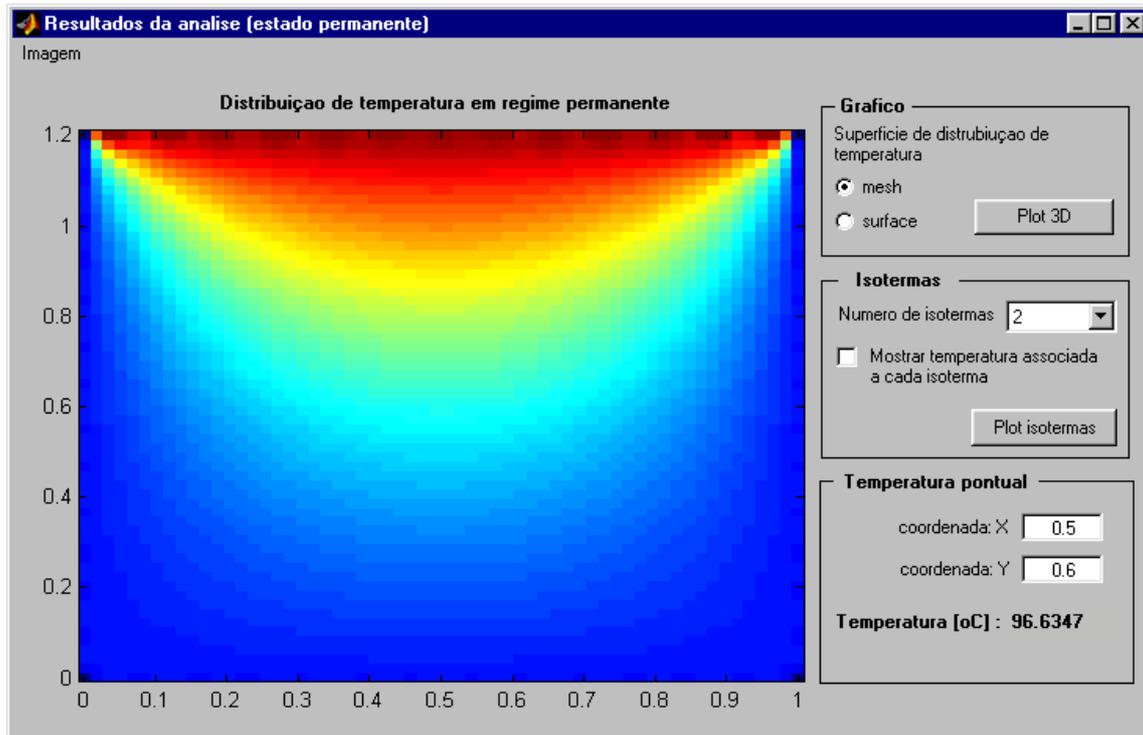


Figura 5 – Ambiente para visualização e análise da solução

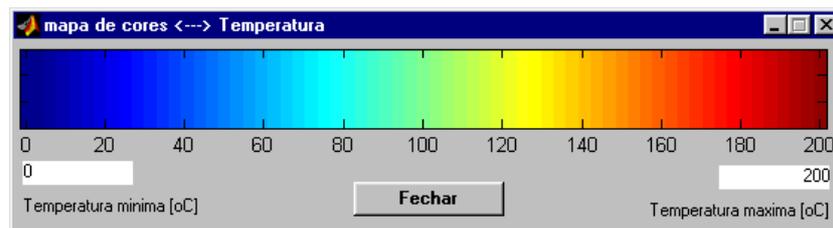


Figura 6 – Correspondência entre o mapa de cores e o gradiente de temperatura

Adicionalmente a esta forma de visualização da solução existem diversas outras funcionalidades alternativas, incluindo opções distintas de apresentação da matriz térmica, ferramentas de análise numérica, alteração do mapa de cores e correspondência térmica e possibilidade de exportar qualquer dos gráficos apresentados para outros aplicativos, para citar os mais importantes.

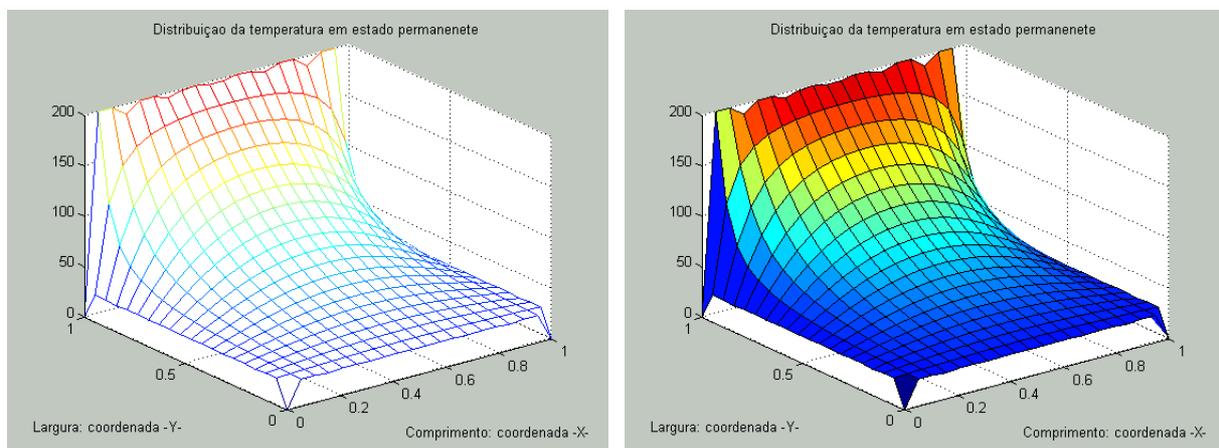


Figura 7 – Formas alternativas de visualização tridimensional da solução

Estas ferramentas de análise e visualização reforçam o caráter didático do ambiente, pois permitem ao usuário interagir com o processo e explorar formas alternativas de compreensão da solução. Serão apresentadas, de forma ilustrativa, algumas destas funcionalidades do ambiente. A “Figura 7” mostra uma forma alternativa de visualização da solução, onde o gradiente térmico é apresentado em duas opções tridimensionais

Outra opção possível consiste na apresentação do gradiente térmico no interior da superfície mediante suas isotermas exatas, sendo possível ao usuário não só a escolha do número de isotermas, mas também exibir a temperatura associada a cada uma “Figura 8”.

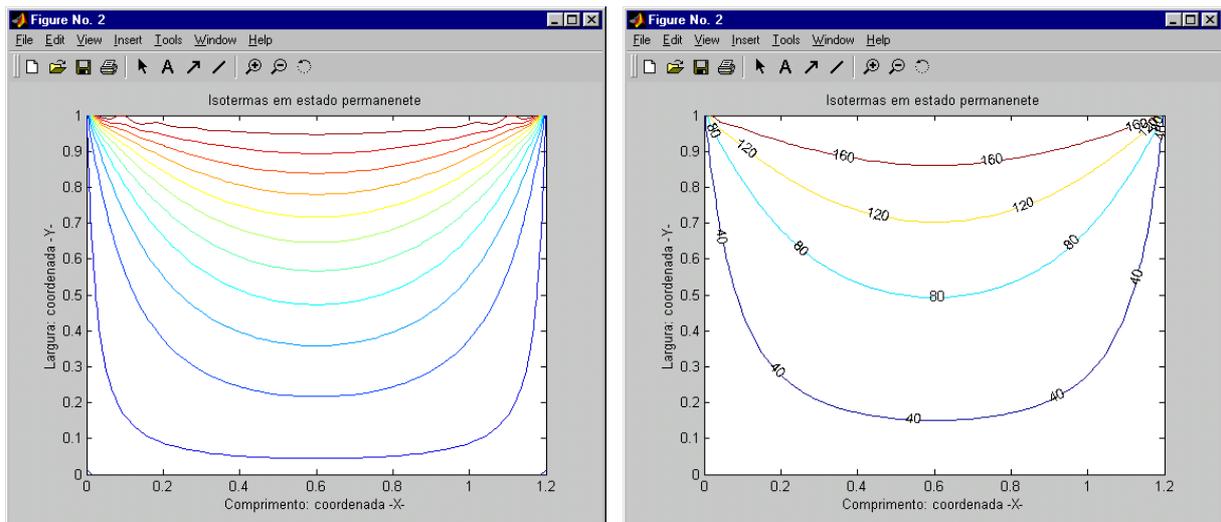


Figura 6 – Visualização com 12 isotermas (esquerda) e 4 isotermas (direita), com as respectivas temperaturas associadas

Outra funcionalidade consiste na avaliação numérica da temperatura associada a qualquer ponto do interior da superfície em análise, a partir da janela “Temperatura pontual”. Na “Figura 4”, por exemplo, está sendo exibida a temperatura no centro da superfície ($T=96,6^{\circ}\text{C}$), obtida pela especificação das coordenadas correspondentes.

Visualização dos resultados para análise transiente de aquecimento e resfriamento

As funcionalidades associadas a este tipo de análise, são essencialmente as mesmas apresentadas anteriormente; a solução do problema transiente, entretanto, envolve uma variável temporal, permitindo assim considerar o caráter dinâmico do processo de aquecimento ou resfriamento. O desenvolvimento deste ambiente procurou criar uma estrutura de visualização de resultados que permitisse ao usuário compreender exatamente como se processa o fenômeno de transporte de energia no interior dos sólidos e a evolução da distribuição de temperatura, para diferentes condições de contorno e em diversos tipos de materiais.

A apresentação da dinâmica do ambiente pode partir da seguinte situação exemplo: considere um processo de tratamento térmico industrial, onde um cilindro de níquel, com dimensões iguais a 0,8m de raio e 1m de comprimento, inicialmente a 600°C , deva ser resfriado por circulação forçada de ar, na temperatura ambiente. A estrutura do ambiente será utilizada para analisar a evolução do processo de resfriamento do sólido e avaliar o tempo

necessário para que isto ocorra. A modelagem do processo é mostrada na “Figura 9”, repare a lista completa de parâmetros.

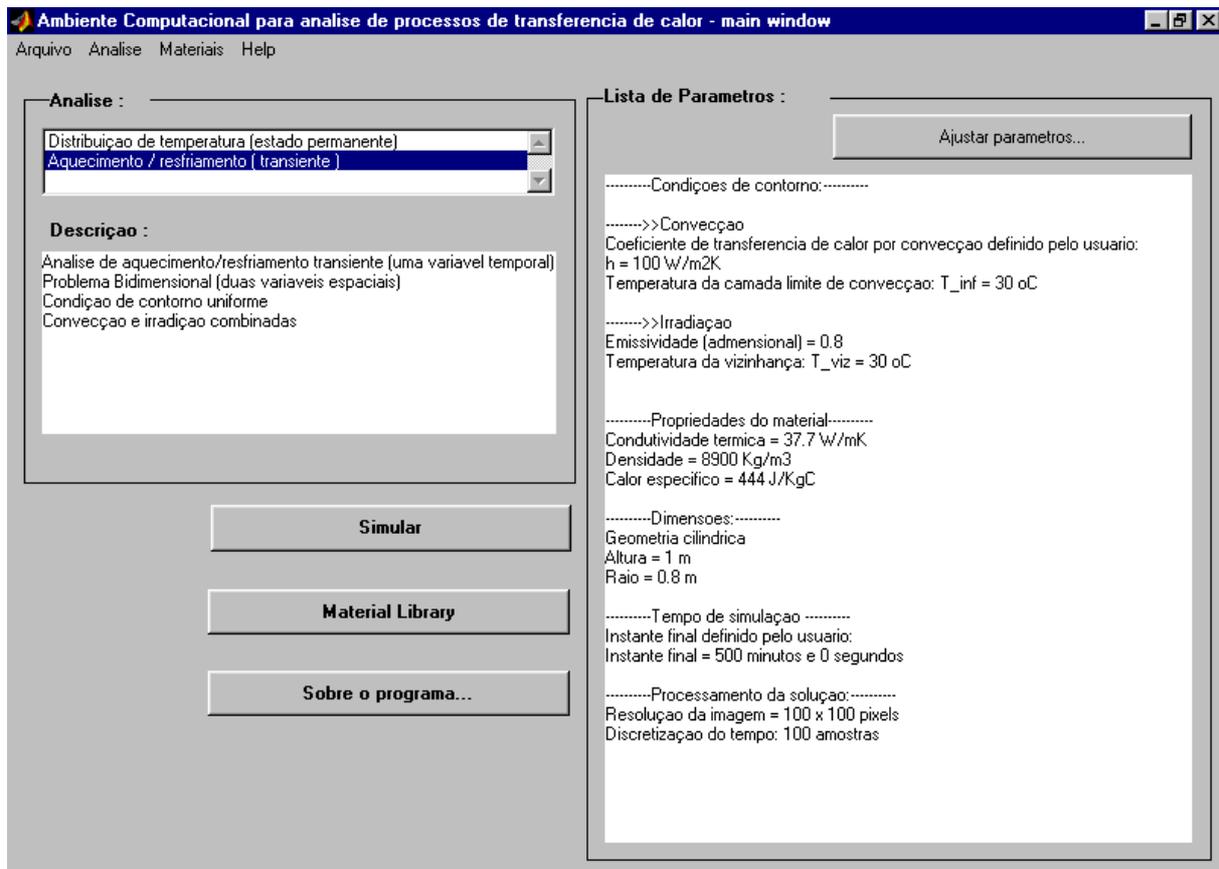


Figura 9 – Análise de processo de resfriamento

O processo de cálculo, para este caso, leva aproximadamente 25 segundos (computador Pentium 200MHz). A solução é apresentada em um ambiente integrado, específico para este tipo de análise, conforme pode ser visto na “Figura 11”. A análise transiente é auxiliada pela barra horizontal designada “Escala de tempo”, a partir deste objeto é possível avançar ou retroceder o “Instante atual” e visualizar a imagem correspondente, permitindo avaliar a distribuição de temperatura em qualquer instante de tempo, de forma seqüencial ou aleatória, com a atualização da imagem sendo efetuada automaticamente. A situação mostrada na “Figura 11” corresponde ao instante 80 minutos. As temperaturas correspondentes podem ser avaliadas a partir do mapa de cores exibido na “Figura 10”.

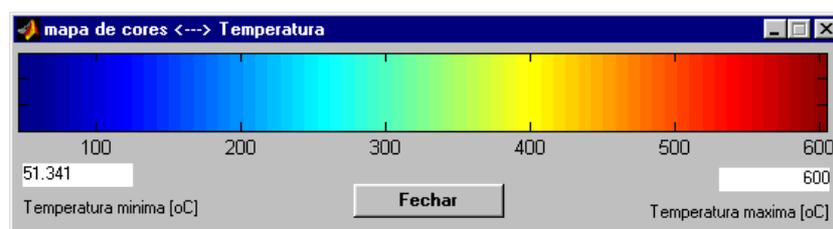


Figura 10 – Correspondência entre cores e temperaturas

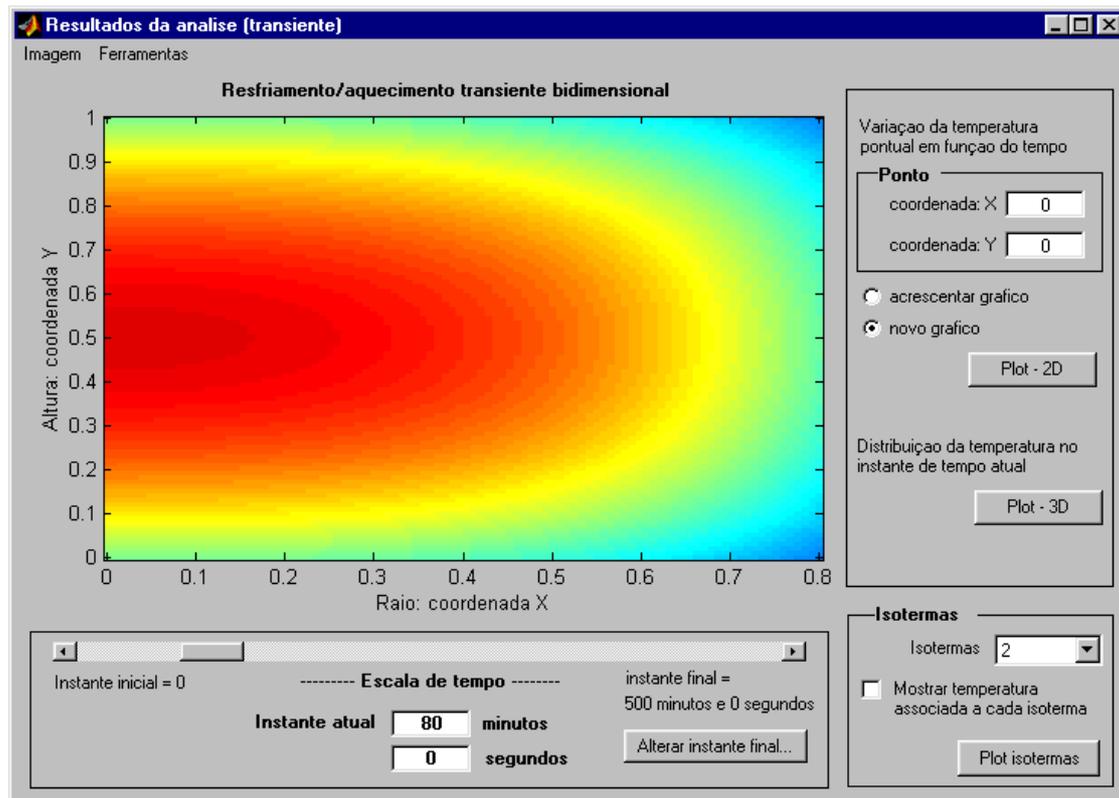


Figura 11 – Ambiente para visualização e análise da solução transiente

A visualização do processo pode ainda ser efetuada mediante animação, com exibição das imagens de distribuição de temperatura para instantes selecionados, conforme mostrado na “Figura 14”. Adicionalmente às funcionalidades mostradas, o ambiente ainda disponibiliza as seguintes ferramentas:

- Visualizações alternativas em gráficos 3D
- Isotermas
- Mapa de correspondência entre cores e temperaturas.
- Evolução temporal da temperatura em pontos específicos da geometria
- Fluxo térmico superficial

Os três primeiros foram apresentados na seção anteriores.

A “Figura 12” mostra a evolução da temperatura na superfície e no centro do cilindro. Como esperado, nos instantes iniciais a temperatura na superfície cai rapidamente enquanto a temperatura no centro se mantém aproximadamente constante, ao final de um longo intervalo de tempo, as temperaturas se aproximam da temperatura ambiente.

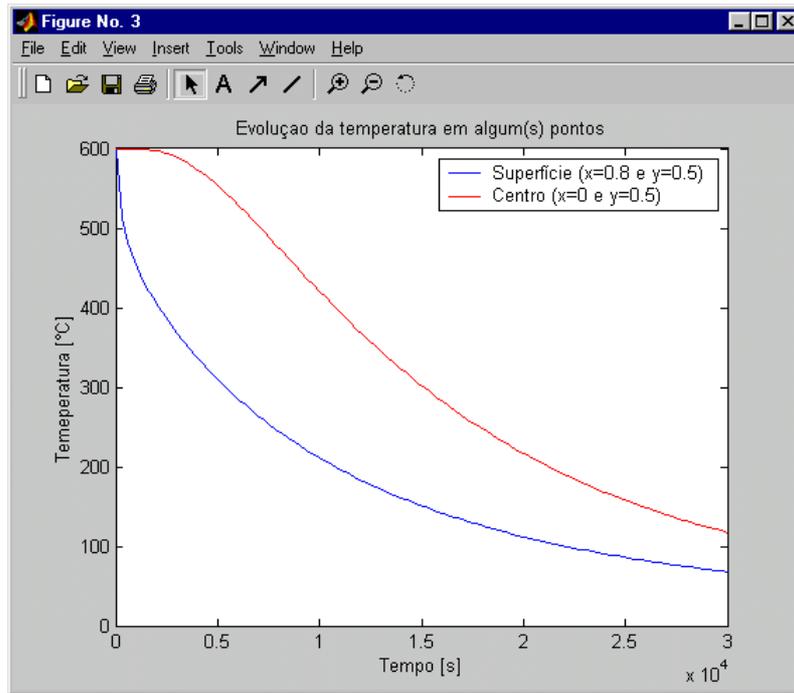


Figura 12 – Evolução da temperatura no centro e na superfície do cilindro

Na “Figura 13” é apresentada uma comparação entre o fluxo térmico superficial devido à convecção e a irradiação separadamente, para altas temperaturas a transferência de calor por irradiação é comparável à convecção, portanto nessa faixa de temperaturas a irradiação não pode ser simplesmente desprezada pois isto implicaria um erro significativo nos resultados. As ferramentas de análise disponíveis permitem que esses e outros aspectos da simulação possam ser prontamente analisados pelo estudante.

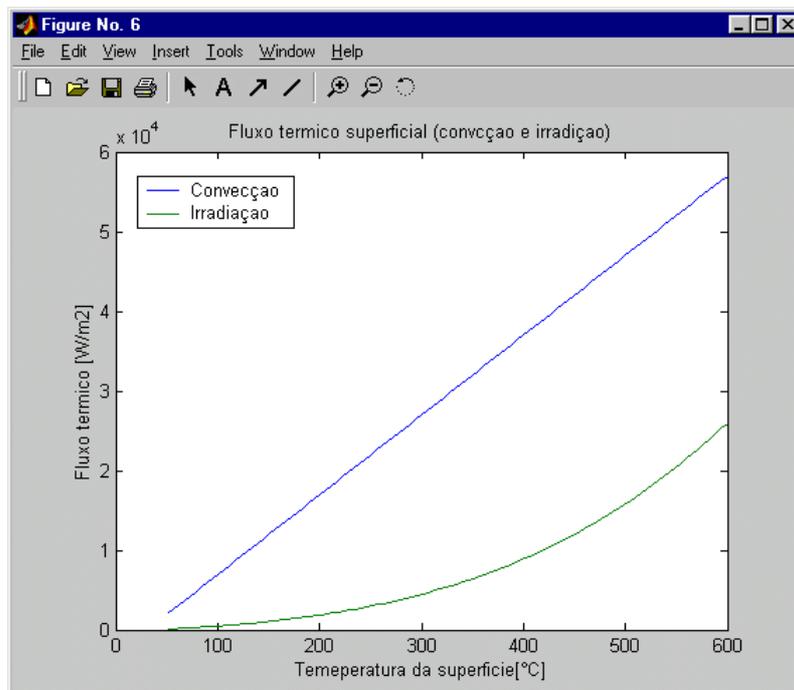
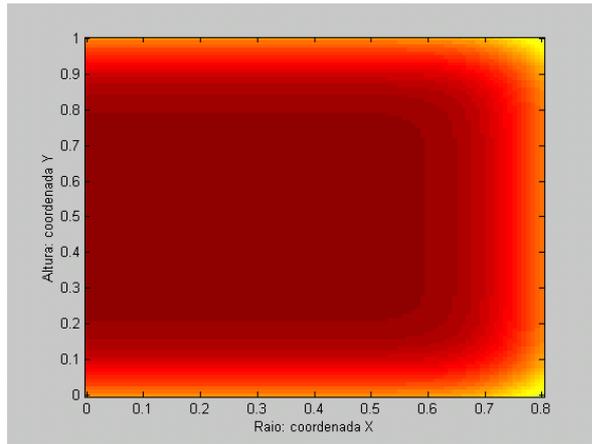
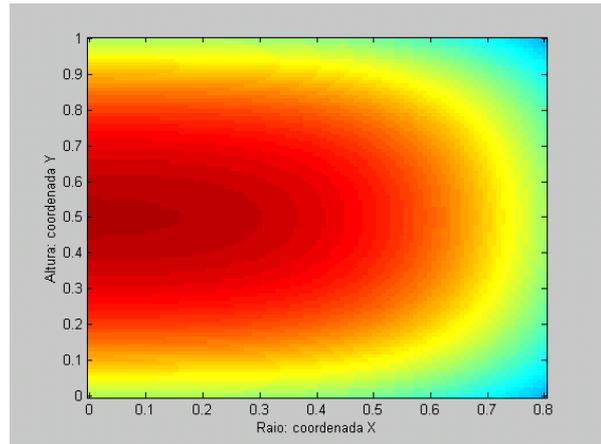


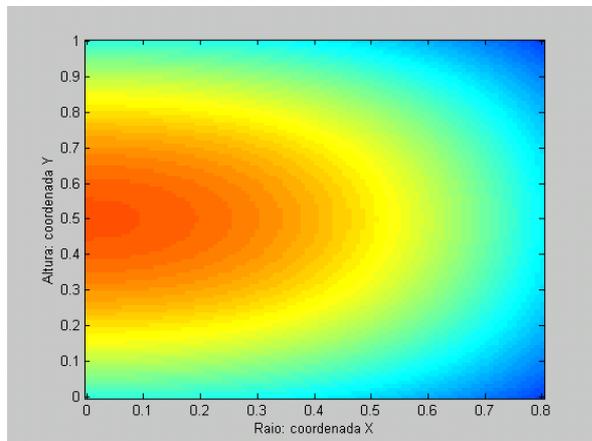
Figura 13 – Fluxo térmico superficial: convecção e irradiação



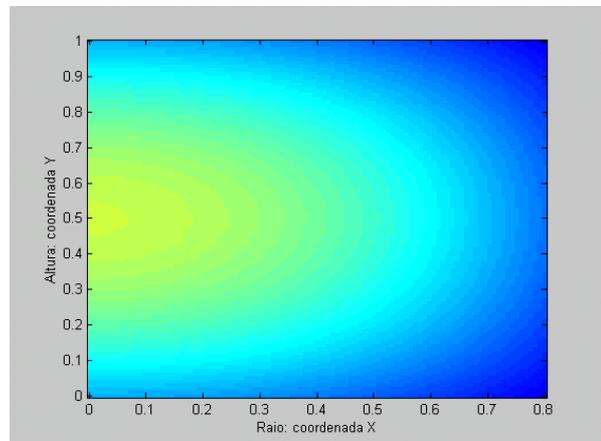
(a) 5 minutos



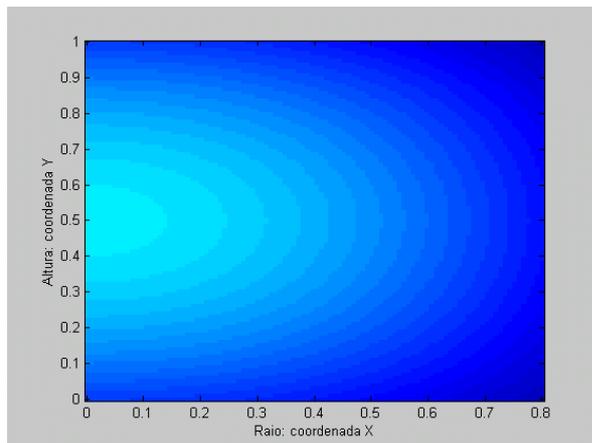
(b) 1 hora



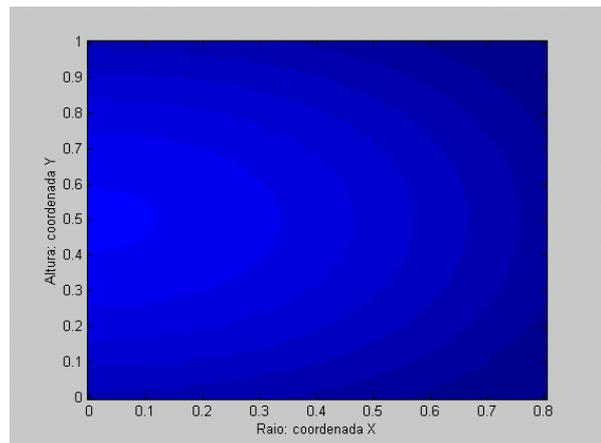
(c) 2 horas



(d) 3 horas e 20 minutos



(e) 5 horas



(f) 8 horas e 20 minutos

Figura 14 – Distribuição de temperatura em instantes específicos

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido se revelou de grande importância para ensino de disciplinas que envolvam processos de transferência de energia, pois as funcionalidades integradas permitem



que o usuário/estudante possa interagir com o processo para verificar resultados teóricos e ainda simular situações diversas para tirar conclusões próprias.

As ferramentas de análise disponibilizadas permitem avaliar casos encontrados em situações industriais, tornando claro a aplicabilidade prática do programa e também das disciplinas envolvidas. Adicionalmente, o ambiente se revela de extrema simplicidade para utilização. As diversas formas de apresentação e análise de resultados possibilitam que o usuário possa realizar as mais diversas simulações e visualizar toda a dinâmica subjacente aos fenômenos térmicos.

Um aspecto de destaque, que talvez constitua o principal diferencial do ambiente desenvolvido é a estrutura para visualização gráfica dos resultados numéricos obtidos, neste aspecto o ambiente se destaca como uma ferramenta de auxílio visual que pode ser utilizada por professores para ensino e para estudos diferenciados dos fenômenos térmicos.

Vale ressaltar que, atualmente, o ambiente já está sendo utilizado, com excelente aceitação por parte de professores e alunos, nas aulas de Fenômenos de Transporte, ministradas na Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. Desejamos que todo o potencial do trabalho possa também ser passado a outras instituições de ensino superior.

Agradecimentos

Ao Programa Especial de Treinamento – PET/SESu/UFJF.

Aos professores José Paulo e Flávio Takakura do Departamento de Física da UFJF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUCHANAN, J.L and TURNER P.R. **Numerical Methods and Analysis**. McGRAW HILL, New York, 1992.

GROBER, H., ERK, S., GRIGULL, U. **Fundamentals of heat transfer**. McGRAW HILL, New York, 1961

INCROPERA, F. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro-RJ: Editora LTC, quarta edição, 1998.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência e Tecnologia de Materiais**. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1984.

INTEGRATED INTERACTIVE ENVIRONMENT FOR ANALYSIS AND VISUALIZATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES

Abstract: *The proposed environment consists of an integrated environment developed to analyse and visualise heat transfer processes in solids. The environment has special integrated options for visualisation of stationary and transient solutions, including a material library with different options, with their physical properties, and that can be used as a reference tool. Easy to explore and with friendly interface, the environment represents an important and useful didactic tool that may be used by teachers, students and industrial operators, improving the study and learning conditions in transport phenomena.*

Key-words: *Heat Transfer, Transport phenomena, Simulation*