

UMA PROPOSTA DE PROJETO DE INTEGRAÇÃO INTERDISCIPLINAR

João C. M. Coelho¹; Paulo L. Belisário²; Jayme P. Ortiz³

Instituto Mauá de Tecnologia – Escola de Engenharia Mauá

Praça Mauá 1, São Caetano do Sul – SP

CEP: 09580-900

1jcmcoelho@maua.br; 2paulo.belisario@maua.br; 3ortiz@maua.br; 3jportiz@usp.br

***Resumo:** devido a questões de ordem histórica, cultural e didática, os cursos de engenharia são constituídos por conjuntos de disciplinas reunidas de modo a formar grupos com a característica de abordar, em seu conjunto, assuntos correlatos e/ou acoplados que, por serem tratados em disciplinas diferentes, podem causar para o aluno a impressão de serem independentes criando dificuldades de inteligência, aprendizado e, sobretudo, produzindo, em nível profissional, a dificuldade de abordar problemas de forma sistêmica e integrada. Buscando dar um tratamento didático pedagógico a essa questão, tem sido desenvolvido, nos últimos dois anos, na Escola de Engenharia Mauá, um trabalho de integração dos temas Termodinâmica, Transferência de Energia por Calor e Mecânica dos Fluidos aplicado às turmas de engenharia mecânica tanto do período diurno quanto do noturno. Resultados qualitativos apontam para o sucesso do trabalho desenvolvido bem como para a necessidade de aprimoramentos.*

***Palavras-chave:** Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos, Calor, Energia, Integração.*

1. INTRODUÇÃO

No curso de engenharia mecânica da EEM, a disciplina EMC601 – Termodinâmica é anual, sendo oferecida na terceira série, e os tópicos transferência de energia por calor e mecânica dos fluidos são reunidos em uma disciplina também anual denominada EMC602 – Fenômenos de Transporte oferecida na terceira série para os alunos que estudam no período diurno e, na quarta série, para os alunos que estudam no período noturno. Embora haja outras disciplinas que, a partir dessas, abordam o conjunto de conhecimentos estabelecidos pela EEM como sendo de importância básica e concernentes a máquinas de fluxo e à análise de sistemas térmicos diversos as quais têm papel integrador na medida em que requerem e aplicam conhecimentos preliminarmente ministrados, verificou-se a necessidade de criar um mecanismo que desempenhasse um papel integrador complementar, preparando o aluno com vistas a um melhor aproveitamento dos tópicos futuramente ministrados. Observa-se que o curso de fenômenos de transportes é conduzido em duas frentes – mecânica dos fluidos e transferência de energia por calor – por dois professores distintos que, na condução da disciplina, agem no sentido de estabelecer pontes e interligações entre as frentes que precisam ser consolidadas. Nesse contexto, foi proposto o desenvolvimento de um trabalho visando à conclusão dos estudos requeridos por estas disciplinas e orientado à busca de forte interligação de conceitos e atividades, tornando-se um trabalho intrinsecamente integrador.

2. A EVOLUÇÃO DO USO DE CONHECIMENTOS NA ÁREA DE ENERGIA E FLUIDOS

A diferença fundamental na aplicação profissional de conhecimentos adquiridos em cursos de engenharia, nos dias de hoje, em relação aos cursos realizados em passado recente está fortemente atada ao desenvolvimento tecnológico que tem conduzido ao rápido e fácil uso de métodos numéricos. Por este motivo, a aplicação profissional dos usos dos conhecimentos de engenharia está, a cada dia, mais intrinsecamente ligada à capacitação profissional de aplicação de procedimentos de cálculo que envolvem análise numérica e desenvolvidos a partir do conhecimento operacional de pelo menos um de uma grande quantidade de códigos computacionais comercialmente disponíveis para o desenvolvimento de projetos nas mais diversas áreas da engenharia.

Por outro lado, é fundamental que os conhecimentos teóricos básicos sejam tratados com a maior profundidade possível, o que, para o aluno, mostra-se como um processo dicotômico na medida em que ele, pela inexperiência, pode pressupor que um programa computacional resolva tudo, dispensando o aprendizado teórico e conceitual. Paralelamente, na área de energia e fluidos, é facilmente perceptível que a capacidade profissional calcada em métodos puramente analíticos permite apenas o tratamento de um número limitado de tipologias de problemas reais, o que, embora seja de fundamental importância, pode ser visto pelo mercado de trabalho, bem como pelos alunos, como deficiente ou, ainda, desnecessário. Em contraposição, não há espaço, em um curso básico de fenômenos de transporte, para desenvolver conhecimento e capacitação referente aos usos e às aplicações profissionais de códigos computacionais comerciais com a profundidade que, em algumas situações, é requerida pelo mercado, mesmo assim, o aluno deve ser e estar preparado para aprofundar e complementar seus conhecimentos, inserindo-se com força e competência nesse competitivo mercado.

Outro aspecto a ser considerado consiste no fato de que as soluções analíticas dos problemas transitórios são ainda mais complexas do que aquelas obtidas em condição de regime permanente ou estado estacionário, isso conduz o engenheiro, muitas vezes, a tratá-los de forma superficial ou, ainda, errônea, esquecendo-se de que muitos assuntos requerem uma análise temporal cuidadosa e que, freqüentemente, apenas é obtida pela aplicação de métodos computacionais.

Assim, na medida em que se queira formar profissionais preparados para se especializarem profissionalmente na área de energia e fluidos, é inevitável que, nas disciplinas correlatas, busque-se a ampliação do uso de métodos computacionais na solução de exercícios e problemas de ordem didática, cujas soluções estejam aliadas à forte capacitação teórica, estimulando e dirigindo o aluno a preparar-se para exercer com capacidade a sua profissão.

3. A ABORDAGEM PROPOSTA

Com o propósito de buscar mitigar as dicotomias, maximizar o aprendizado, qualificar o aluno, integrar conhecimentos de disciplinas afins e estimular a busca do futuro aprendizado, propôs-se, no curso EMC602 – Fenômenos de Transporte, que já contava com um mecanismo de avaliação por intermédio de provas e trabalhos, a inserção de um trabalho de encerramento de disciplina com valor diferenciado, o qual tem o objetivo de fazer com que grupos de alunos estudem e proponham soluções para problemas abertos ou parcialmente abertos (problemas cujas soluções sejam estabelecidas em ambiente tecnológico com grau de liberdade limitado) que requeiram, na abordagem, conhecimentos de termodinâmica, transferência de energia por calor, mecânica dos fluidos e do comportamento de equipamentos diversos.

Os problemas trabalhados, além de serem abertos ou parcialmente abertos, têm características próprias, exigindo o entendimento de fenômenos transitórios, a elaboração da modelagem matemática do problema como um todo e a criação de um programa computacional.

A disciplina EMC602 é ministrada para cerca de 60 alunos divididos entre os turnos diurno e noturno. Em cada turno, os alunos são divididos em grupos de, no máximo, três pessoas e, para cada grupo, é oferecido um problema diferente a ser trabalhado sendo que, a cada ano, novos problemas são incorporados, e os enunciados dos antigos são retrabalhados buscando uma renovação parcial contínua.

Uma questão transversal tratada, ao se trabalhar o problema, consiste na exigência de que cada grupo de trabalho emita um relatório final encerrando o trabalho com uma apresentação seguida de arguição, sendo a atribuição da nota individual e fortemente atrelada aos resultados da apresentação e da arguição. O relatório deve obrigatoriamente incluir alguns tópicos como, por exemplo: introdução, enunciado do problema proposto, o modelo matemático desenvolvido, o programa computacional realizado, os resultados auferidos e as conclusões. A exigência de emissão de relatório final foi estabelecida com a finalidade de educar o aluno no sentido de escrever melhor expondo suas idéias e proposições de forma estruturada e organizada fazendo parte, inclusive, da preparação do aluno para o futuro desenvolvimento do seu trabalho de graduação.

4. INFRA-ESTRUTURA REQUERIDA

Visando ampliar o apoio didático às diversas disciplinas ministradas ao longo dos cursos de engenharia e gestão oferecidos pela Escola de Engenharia Mauá, optou-se por disponibilizar para os alunos o programa computacional EES – ENGINEERING EQUATION SOLVER. Trata-se de um código computacional que tem como função básica resolver um conjunto de equações incluindo equações algébricas, diferenciais e integrais. Esse software tem uma biblioteca de funções matemáticas e termodinâmicas bastante extensa, permitindo o acesso direto e imediato, por exemplo, a propriedades termodinâmicas e de transporte. Para o aluno, a facilidade existente para a determinação de propriedades no ambiente do EES consiste em fundamental apoio, porque, além de não exigir o desenvolvimento de sub-rotinas para cálculo de propriedades, o que, por si só já seria um trabalho independente do curso, permite o desenvolvimento de soluções mais precisas obtidas a partir de modelos mais acurados.

Além da disponibilidade desse código, foi preparada uma pequena apostila, por um aluno monitor, com o propósito de auxiliar no uso do EES.

Buscando obter as melhores soluções possíveis, foi implantado um processo de atendimento extraclasse visando sanar dúvidas e propor formas de encaminhamento de soluções. Participam deste atendimento um aluno monitor, que dedica 15 horas por semana, e dois professores, que disponibilizam pelo menos três horas semanais para atendimento.

5. AVALIAÇÃO

Os trabalhos desenvolvidos pelos alunos são avaliados em quatro níveis.

No primeiro, há uma avaliação balizada pelo interesse e pela dedicação do aluno em resolver o problema proposto ao longo do período decorrente do início dos trabalhos até a entrega do relatório final acompanhada da sua apresentação ao professor que é da ordem de 30 a 45 dias. Nesse intervalo de tempo, é avaliado, por intermédio das discussões técnicas entre os alunos e os professores realizadas em regime de atendimento extraclasse, se o trabalho está sendo realizado, se todos os alunos do grupo estão se dedicando, quais são as dificuldades encontradas e em que nível estão e se as sugestões do professor emitidas na última consulta foram objeto de trabalho e estudo.

No segundo nível, o conteúdo do relatório é avaliado; no terceiro; a avaliação é estabelecida com base na apresentação final do trabalho e no resultado da arguição pós-

apresentação, o que leva à aplicação de notas individuais. Por fim, há um quarto nível de avaliação estabelecido pela possibilidade de que conceitos básicos comuns aos trabalhos desenvolvidos possam ser objeto de questões componentes da quarta e última prova regular do curso.

6. TIPOLOGIA DOS PROBLEMAS TRATADOS

Os problemas sugeridos para solução devem ter conteúdo compatível com a evolução segundo a qual os tópicos do curso são ministrados e necessariamente compatível com o plano de ensino da disciplina, SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C., VAN WYLEN, G. J., 2003, FOX, R.W., MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J, 2006, INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P., 2003. Até o momento no qual os problemas são propostos para a solução, final da primeira quinzena do último bimestre, os seguintes assuntos já foram tratados:

- a) primeira e segunda leis da termodinâmica formuladas para sistemas e na forma integral para volumes de controle;
- b) princípio da conservação da massa formulado na forma integral para volumes de controle;
- c) equação integral da quantidade de movimento e do momento da quantidade de movimento formuladas para volumes de controle inerciais;
- d) equação de Bernoulli;
- e) análise dimensional e semelhança;
- f) escoamentos viscosos internos;
- g) escoamentos viscosos externos;
- h) condução em estado estacionário e transiente;
- i) radiação;
- j) convecção forçada interna e externa e convecção livre.

Além destes tópicos, o estudo de trocadores de calor está em andamento.

Tendo em vista a diversidade de assuntos a serem trabalhados, observa-se que os problemas tratados não incluem necessariamente a abordagem de fenômenos transitórios, e os temas transmissão de energia por calor, mecânica dos fluidos e termodinâmica não estão presentes com a mesma intensidade em todos os problemas apresentados aos alunos.

A seguir, apresentam-se os enunciados de dois dos problemas solucionados.

PROBLEMA A

Em uma indústria, deseja-se aproveitar a energia presente em gases de escape de uma chaminé para prover o aquecimento de água disponível a 25°C, utilizando-se, para isso, um trocador de calor. Conforme ilustrado na Fig. 1, o departamento de engenharia da empresa está sugerindo que a água seja bombeada de um reservatório até o trocador de calor tipo casco e tubo que conte com 75 tubos com diâmetro interno 25 mm e espessura de parede 1,0 mm. A restrição ambiental do projeto é a de que a temperatura de saída dos gases do trocador de calor deve ser limitada em 75°C e, para tal, foi instalada uma válvula de controle de vazão na tubulação de recalque da bomba; esta válvula permite controlar a vazão de modo a manter a temperatura dos gases na saída do trocador em uma temperatura pré-estabelecida que pode ser escolhida no intervalo de 20°C a 200°C.

A vazão disponível de gases é igual a 10.300 m³/h avaliada a 780 mmHg absolutos e a 27°C, seu calor específico foi estimado em 1,0 kJ/(kgK), e a temperatura dos gases na entrada do casco do trocador é igual a 250°C.

Para prover o bombeamento de água, a empresa tem disponível uma bomba centrífuga que deve ser aproveitada. Consultando o catálogo do fabricante, obteve-se a sua curva

característica pressão versus vazão que foi aproximada pela parábola de equação $p_2 - p_1 = 5.400.000 - 4.200\dot{m}_f^2$. A perda de pressão através do trocador foi avaliada experimentalmente, e verificou-se que ela pode ser modelada pela expressão: $p_5 - p_6 = 426\dot{m}_f^2$. Também foi avaliado o produto do coeficiente global de transmissão de calor pela área do trocador encontrando-se o valor 7.900 W/K.

Consultando o catálogo da válvula de controle disponível, verificou-se que a relação entre a diferença de pressões entre a entrada e a saída da válvula e a vazão mássica é dada pela curva experimental: $\dot{m}_f = C_v \sqrt{p_3 - p_4}$ na qual o coeficiente C_v é uma função do seu grau de abertura e expresso em função da temperatura Tq_2 conforme correlação linear apresentada na Fig. 2. Em todas as expressões acima, as pressões são dadas em Pa e a vazão mássica em kg/s.

Observa-se ainda que, na Tabela 1, encontram-se dados sobre a tubulação, e que as seções 2, 3 e 4 estão, respectivamente, nas cotas 0,2 m, 0,3 m e 0,5 m.

Para as condições estabelecidas, enuncie todas as hipóteses necessárias e equacione o processo de forma a determinar as seguintes informações necessárias ao detalhamento do projeto de engenharia:

- a) a vazão mássica de água;
- b) a temperatura de descarga da água;
- c) a pressão à montante e à jusante da válvula de controle;
- d) a porcentagem de abertura da válvula de controle;
- e) a curva característica do sistema (vazão versus altura manométrica) e o ponto de trabalho da bomba;
- f) considerando curvas de catálogos de fabricantes e comparando-as com aquela definida nesse enunciado sob a forma de parábola, determine a potência e estime o rendimento de uma bomba necessária para o processo;
- g) verifique se a temperatura de saída do gás é compatível com a restrição ambiental e, em caso contrário, indique quais seriam as medidas necessárias de adequação.

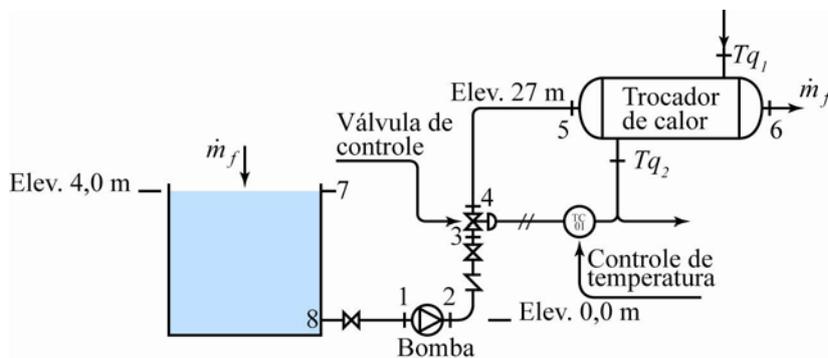


Fig. 1: Diagrama esquemático-problema A

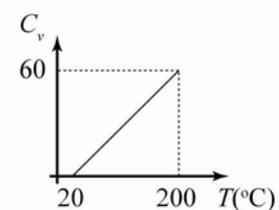


Fig. 2: C_v versus temperatura

Tabela 1: características técnicas da tubulação

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Material	Curvas/quantidade	Tipo de válvula/ quantidade
8-1	1,0	102,3	Aço carbono	90° / 1	Gaveta / 1
2-3	1,0			-----	Retenção / 1 Globo / 1
3-4	-----			-----	Válvula de controle / 1
4-5	30,0			90° / 13	

PROBLEMA B

Sob condições usuais de operação, gás hélio inicialmente a 300 K e 7,0 bar escoa em regime permanente com vazão mássica de 5,0 g/s através de uma tubulação que alimenta uma pequena turbina conforme mostrado na Fig. 3 a qual, sob certas condições, tem a sua operação interrompida por curtos períodos de tempo. Considerando que a vazão mássica de hélio não pode variar ao longo do tempo, e que o seu escoamento não pode ser obstruído, a fim de interromper a operação da turbina, o escoamento de hélio é direcionado para o tanque cilíndrico vertical C cujo volume interno é igual a 4,0 m³ e que é equipado com válvula de alívio que descarrega para a atmosfera. O processo de redirecionamento da vazão de hélio ocorre da seguinte forma: quando a turbina é desativada, a válvula de bloqueio B é fechada, e a válvula A é aberta fazendo com que o hélio escoe para o tanque C, e, quando a pressão no tanque C atinge 2,8 bar, a válvula de alívio D abre descarregando o gás para a atmosfera.

Considere que, inicialmente, o tanque C contém pequena quantidade de gás de forma que a sua pressão absoluta é muito baixa, que as propriedades do gás são uniformes na entrada do tanque, que ele pode ser considerado um gás ideal, e que energia é transferida por calor entre as paredes do tanque e o meio externo que está na temperatura de 18°C.

Supondo que a válvula E permanece fechada, pede-se para:

- escolher dimensões do tanque respeitando-se o fato de ser cilíndrico, vertical com volume igual a 4,0 m³;
- estabelecer o conjunto de hipóteses necessárias para a solução do problema;
- elaborar um modelo matemático que permita obter o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o tanque e o meio ambiente, a taxa de transferência de calor entre o tanque e o meio ambiente, a pressão e a temperatura do gás no tanque C ao longo do tempo;
- determinar o intervalo de tempo decorrido desde o início do enchimento do tanque até a sua pressão atingir 2,8 kPa.

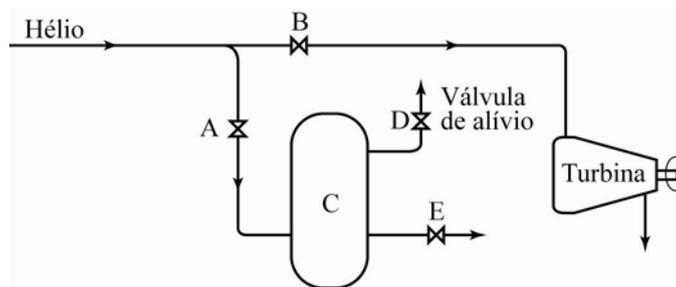


Fig. 3: Diagrama esquemático-problema B

7. COMENTÁRIOS FINAIS

Este projeto integrador multidisciplinar já foi aplicado em dois anos letivos e o será novamente no último bimestre de 2008. Essa experiência indica a necessidade de contínua renovação dos problemas propostos, buscando melhorar seus enunciados de forma que uma quantidade menor de dúvidas seja suscitada e que haja, simultaneamente, a contínua inserção de novos enunciados voltados a situações de problemas que estejam o mais próximo possível de situações reais, mas possam ser adequadamente tratadas utilizando-se os conhecimentos até então ministrados. Verifica-se que uma situação limitante é a falta de maturidade por parte dos alunos necessária ao trato técnico requerido pelos problemas, mas que tende a ser suprida

pelo atendimento provido pelos professores. Além disso, o trabalho requerido para o desenvolvimento das soluções é um fator de amadurecimento técnico e profissional.

Embora as limitações sejam relativamente importantes, foi observado, ao longo do passado recente, que a postura dos alunos frente ao curso mudou, e estes passaram a julgar essa disciplina além de difícil, de larga aplicabilidade e que fornece conhecimentos considerados realmente úteis para a vida profissional.

Por fim, deve ser levado em consideração que a Escola de Engenharia Mauá implantou e disponibilizou aos alunos um programa destinado a soluções de problemas no âmbito da mecânica dos fluidos computacional e que, em futuro próximo, poderá ser utilizado para resolver novos problemas mais complexos que exijam procedimentos de cálculo mais sofisticados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C., VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica**, tradução da 6ª edição americana, São Paulo: Edgard Blücher, 2003, 537 p.

FOX, R.W., MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 6ª edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006, 798 p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**, 4ª edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003, 698 p.