

Discussão de uma metodologia para o ensino da disciplina "Máquinas Térmicas"

José Antônio Perrella Balestieri

UNESP – Campus de Guaratinguetá, Av. Ariberto P. Cunha, 333- 12516-410- Guaratinguetá, SP
perrella@feg.unesp.br

Rubens Alves Dias

UNESP - Campus de Guaratinguetá, Av. Ariberto P. Cunha, 333- 12516-410- Guaratinguetá, SP
GSI– Engenharia e Consultoria Ltda., Rua Mato Grosso, 120 - 12062-120 - Taubaté, SP
rubdias@zipmail.com.br

Resumo: *Os cursos de Engenharia Mecânica, em geral, apresentam em sua estrutura disciplinas básicas da área de Térmica e Fluidos que se alicerçam no tripé Mecânica dos Fluidos - Termodinâmica - Transmissão de Calor, além de um conjunto de disciplinas complementares, ministradas como disciplinas obrigatórias ou eletivas a depender de cada proposta pedagógica e voltadas à apresentação de conceitos ou informações gerais sobre diferentes aspectos energéticos e tecnológicos. Em meio aos esforços dos profissionais da área térmica para a difusão dos conteúdos dessas disciplinas, observam-se problemas em se transmitir uma maior aderência à realidade prática, seja pelas dificuldades na passagem dos ciclos teóricos para os ciclos reais, seja pela pouca vivência dos docentes no emprego de ferramentas baseadas na Segunda Lei da Termodinâmica. Os ciclos térmicos empregados para geração de energia e a tecnologia associada à constituição e desempenho das máquinas térmicas poderiam ser transmitidos aos alunos partindo-se do geral para o específico, ou vice-versa. Neste trabalho propõe-se que a transmissão do conhecimento se faça pela apresentação das características de projeto e operação dos componentes de forma individual para, posteriormente, serem analisados na forma de sistema.*

Palavras-Chave: *máquinas térmicas, proposta metodológica, análise de sistemas.*

1. INTRODUÇÃO

A estrutura dos cursos de Engenharia Mecânica, assim como muitos dos cursos com alguma necessidade de conhecimentos mais profundos que aqueles transmitidos em disciplina básica de Fenômenos de Transportes (tal como ocorre com as Engenharias de Produção Mecânica, Química e Industrial, apenas a título de exemplo), pautam a área térmica com base nos conteúdos apresentados em disciplinas tradicionalmente ministradas como Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Transmissão (ou Transferência) de Calor, a partir daqui referidas como 'disciplinas fundamentais' da área térmica.

A partir do conhecimento sólido adquirido nas disciplinas fundamentais o estudante pode alicerçar um conjunto de conceitos cujas matizes revelarão a proposta pedagógica do curso e da Instituição em que realiza seus estudos, bem como seus pendores para um ou outro campo da Engenharia em função de disciplinas eletivas que venha a cursar no âmbito das Engenharias. Com base nas disciplinas fundamentais compõe-se o arcabouço dos conhecimentos necessários para posterior desenvolvimento do estudante em níveis mais aprofundados, tal como se apresenta a seguir, num conjunto limitado - porém significativo - de inter-relações entre as disciplinas:

- o estudo das tensões presentes no fluido conflui ao conceito de pressão, elemento importante para a caracterização do estado termodinâmico dos fluidos, e dentre outros importantes quesitos na Engenharia, é determinante na compreensão dos elementos e modelos de controle de processos, ministrados em geral nos últimos períodos dos cursos;
- a compreensão dos efeitos determinantes da perda de carga conseqüente ao movimento dos fluidos em escoamento deve se compor com o conceito de perdas e irreversibilidades apresentado na Termodinâmica no contexto de sua Segunda Lei e da análise exergetica;
- a análise da compressibilidade de gases a partir do conceito do número de Mach na Mecânica dos Fluidos sinaliza importantes fenômenos contemplados na Termodinâmica e explorados na análise de ciclos térmicos e de seus componentes principais (turbinas e válvulas);
- o estudo das equações básicas da Mecânica dos Fluidos (conservação de massa e de energia, segunda lei de Newton e segunda lei da Termodinâmica) compõe-se com a sua aplicação na Termodinâmica, posteriormente a um estudo mais pormenorizado sobre os conceitos de calor e trabalho, do gás perfeito e das misturas, assim como na Transmissão de Calor, visto que muitos problemas se resolvem pelo balanço de energia sobre um volume de controle tomado sobre o objeto em análise e sobre o qual concorrem condução, convecção e radiação;
- os conceitos associados à psicrometria em cursos de Termodinâmica são fundamentais para a compreensão dos processos envolvidos no condicionamento de ar, assim como o estudo de combustão o é para a adequada avaliação dos ciclos térmicos.

Ainda que sejam concebidos inicialmente do ponto de vista teórico para uma maior clareza didática, nessas três disciplinas os conceitos são posteriormente estabelecidos do ponto de vista real:

- a equação de Bernoulli é inicialmente apresentada, na Mecânica dos Fluidos, como uma igualdade de termos energéticos em dois pontos distintos de escoamentos não viscosos (ideais), e após um tratamento para adimensionalização das variáveis, concebe-se um fator de atrito que permite calcular a perda de carga, o qual equilibra os termos energéticos no escoamento viscoso (real);
- o ciclo de Carnot, assim como os demais ciclos térmicos, é inicialmente apresentado em um curso de Termodinâmica como uma sucessão de processos ideais (isentrópicos, isotérmicos, isocóricos ou isobáricos) e apenas após a introdução do conceito de rendimento, tanto térmico para o ciclo quanto o rendimento dos componentes (turbinas, bomba e compressor), os mesmos aproximam-se da condição real (com maior destaque para a condição não-isentrópica dos processos reais);
- a idealização do conceito de corpo negro para os processos de radiação, nos cursos de Transmissão de Calor, constituem elemento ideal que é, posteriormente, adequado pela introdução do conceito de superfície cinza e pelo estabelecimento dos conceitos de emissividade, transmissividade, absortividade e refletividade.

Desse modo, as Ciências Térmicas acabam sendo subdivididas em diferentes disciplinas, bem como se processam as informações inicialmente pelo campo ideal e posteriormente aproximando-as da condição real, para favorecer aos iniciantes a compreensão dos fenômenos em estudo; contudo, nem sempre se observam esforços, tanto por parte dos docentes quanto dos estudantes, que favoreçam a percepção conjunta dos conceitos então vistos de forma fragmentada. É nesse sentido que se advoga, neste trabalho, a necessidade da composição de conteúdos por meio de uma metodologia que prime por apresentá-los no contexto da composição de configurações de ciclos térmicos, em disciplina que se convencionou chamar Máquinas Térmicas.

2. PERCEPÇÃO DO CONCEITO DE SÍNTESE E MODELAGEM

Exercer a Engenharia implica na necessidade de oferta de soluções para os problemas que surgem da atividade humana; nos dizeres de Asimov (1968),

“Os problemas raramente vêm prontos, com uma proposição apurada e clara dos fatores envolvidos e com, pelo menos, alguns indícios bem assinalados para indicar a solução correta”.

O profissional de Engenharia deve, então, habituar-se a utilizar criatividade para sugerir propostas alternativas para a solução de problemas, em especial porque soluções tecnicamente viáveis podem ser recusadas por limitações de ordem econômica, ou institucionais, conforme se observa na Fig. 1. Quando da elaboração de um projeto, concorre para sua consecução um grande número de variáveis, e para que não se impeça que a criatividade seja exercida de sua forma mais plena é importante que não seja imposto grande número de restrições na fase inicial, visto que isto pode eliminar uma ou mais alternativas singulares para o processo de decisão.

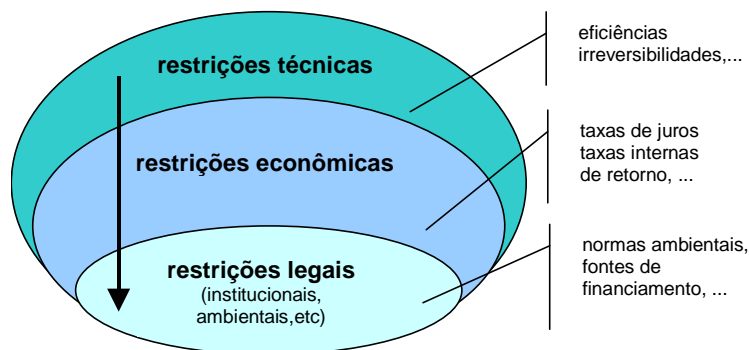


Figura 1. Níveis de profundidade dos estudos de viabilidade

Por isso, o estudo de viabilidade técnica é o primeiro a ser realizado para que não sejam propostas soluções com inconsistências físicas ou restrições construtivas; o processo de criação de sistemas é designado como **síntese**, fator de grande importância para a realização das atividades profissionais de qualquer engenheiro. Por meio da síntese são harmonizadas, no caso da composição de ciclos térmicos, as junções dos componentes selecionados para atender às necessidades de um certo problema.

Vencidas as barreiras técnicas e dispondo-se de algumas propostas viáveis segundo esse critério, é importante que sejam impostas outras restrições pertinentes, como as de ordem econômica, ambientais, sociais, institucionais; de uma maneira geral, as restrições econômicas dizem respeito à disponibilidade de capital para investimento, taxas de juros praticados, prazos para depreciação dos bens imóveis, que causam impacto sobre o empreendimento levando-o a uma maior ou menor atratividade em comparação com os demais, bem como com outras formas de investimento do mercado de capitais.

As restrições legais dizem respeito aos limites de emissão dos poluentes atmosféricos, determinados pela agência local de controle ambiental, por exemplo; aos limites impostos para o emprego de fontes combustíveis numa certa região; às limitações da capacidade de geração em função do local em que se implantará o empreendimento; às taxas e impostos a serem recolhidos aos diferentes níveis de governo; às taxas e impostos a serem recolhidos, em consonância com as estratégias governamentais para incentivo de uma ou outra forma de geração, etc.

Ainda com relação ao conceito de síntese, deve-se considerar que os modelos físico/matemáticos disponíveis em Engenharia correspondem a aproximações da realidade, cujo principal objetivo é permitir ao profissional estimar com certa margem de segurança os valores necessários para dimensionar o projeto ou a operação de um sistema, os quais somados à

experiência na lida de um certo tema formam o arcabouço necessário para o bom desempenho de suas funções profissionais.

Sciubba (1998) apresenta informações esclarecedoras sobre síntese de sistemas energéticos; a partir de um problema simples o autor estabelece as condições básicas para a composição de um arranjo de máquinas e aparelhos térmicos por meio da definição de um valor de potência elétrica e da quantidade de calor a ser recuperada dos gases de exaustão para atender às necessidades térmicas do processo produtivo a ser associado a uma unidade consumidora. Baseado em ciclos térmicos a gás, propõe o uso de uma turbina a gás associada a uma caldeira de recuperação de calor e desenvolve o equacionamento termodinâmico correspondente, numa sequência passo-a-passo, reproduzindo o que se imaginaria ser o algoritmo a ser implementado em um programa computacional dedicado a tal tipo de análise.

Manninen e Zhu (1999) identificam como *“a parte mais difícil de um projeto a determinação da estrutura ótima da central térmica dado que uma grande quantidade de alternativas se encontra disponível, o que torna o problema combinatoriamente explosivo”*. Na sua exposição, *“a forma tradicional de se projetar centrais térmicas está principalmente baseada em técnicas de simulação e fortemente alicerçado na análise termodinâmica. Um projeto-base é assumido a partir de uma central existente e que conta com uma experiência operacional de sucesso. Opções para modificações no projeto-base são obtidas por análise termodinâmica. As opções são verificadas por ferramentas de simulação. O problema dessa metodologia de projeto é que apenas modificações locais ao projeto-base podem ser determinadas, o que resulta em melhorias marginais. É difícil identificarem-se mudanças topológicas¹ significativas pela limitação dessa metodologia”* (p. 452).

A proposição do ensino da prática de síntese dos componentes de sistemas térmicos a partir do conhecimento do comportamento individual de cada equipamento encontra respaldo na literatura. Couvillion (1986), em momento anterior ao atual nível de desenvolvimento tecnológico da informática, propôs a aplicação de um curso de "Análise e projeto de sistemas térmicos" nos anos acadêmicos de 1983/1984 na Universidade de Arkansas, nos Estados Unidos, cujo conteúdo versava sobre: a) revisão de programação de computadores; b) sistemas de bombeamento; c) turbinas, bombas e compressores; d) trocadores de calor; e) simulação de sistemas; f) otimização termoeconômica. Baines et al. (1991) propuseram um curso optativo de "Projeto de sistemas térmicos" no Departamento de Engenharia Mecânica do Imperial College, Londres, pautado na idéia de transmitir o conceito de síntese com vistas a integrar diversas disciplinas de engenharia. De acordo com os autores, *"a principal mudança estava em permitir [ao aluno] estudar a conversão de energia não apenas como uma série de problemas técnicos mas como um sistema interligado de suprimento e demanda, não apenas do ponto de vista termodinâmico mas também com dimensão de recursos, ambiental, econômico, social e político "* (p. 54). A estrutura pedagógica previa por conteúdo: a) turbomáquinas (desempenho e seleção); b) conversão de energia (ciclos a vapor, a gás, combinado, cogeração e estudo de caso sobre cogeração); c) combustíveis e combustão; d) integração e projeto de sistemas em ciclos térmicos; e finalmente, e) opções energéticas para o Reino Unido.

Mais recentemente, com a difusão de *softwares* especialistas para o projeto de centrais térmicas, muito embora seu custo seja quase sempre impeditivo para a realidade acadêmica, a prática da síntese se torna facilitada do ponto de vista de tornar operacionais os cálculos (Forbus *et al.*, 1999; Koda e Takahashi, 2002). Vale frisar que a simples disponibilidade de recursos computacionais não substitui a necessidade de aquisição do conhecimento que dê respaldo técnico para as decisões pelo emprego de um componente em detrimento de outros, a adequada escolha dos níveis de pressão e temperatura dos diversos pontos, ou ainda o regime de operação de cada componente.

Quando do estudo das três disciplinas fundamentais da área térmica nem sempre se encontram oportunidades para que o estudante desenvolva a importante prática da síntese, uma vez que as mesmas já concentram elevada carga de conceitos que devem ser adquiridos; de igual modo, não existem oportunidades para que se desenvolvam aspectos relativos ao projeto, à construção e às

¹ Diz respeito à inclusão e/ou disposição de equipamentos no sistema a ser composto.

condições operacionais de cada um dos componentes de um ciclo térmico, tampouco no que diz respeito à sua seleção a partir de catálogos de equipamentos comerciais.

Em muitas Instituições de Ensino, um conjunto razoável de disciplinas destinadas a complementar sua formação no campo das ciências térmicas é oferecido para a formação dos estudantes; disciplinas como Motores de Combustão Interna ou Geradores de Vapor, por exemplo, oferecidas como obrigatórias ou eletivas (optativas) podem fornecer elementos importantes para a adequação dos conceitos das disciplinas fundamentais à realidade. Nem sempre, contudo, há um direcionamento para o seu emprego no contexto de sistemas, ou seja, apresentam-se informações importantes sobre o que são tais equipamentos, para que servem, como funcionam, mas de uma forma estanque e totalmente centrada na tecnologia em si, e não no seu emprego no contexto de um sistema de geração de energia.

Não quer isso dizer que o "mosaico" dos conhecimentos adquiridos em um conjunto diverso de disciplinas cursadas posteriormente àquelas fundamentais não virá a compor uma imagem com foco mais ou menos nítido, em algum momento da vida acadêmica ou profissional dos futuros engenheiros, de modo a facultar-lhes a integração de conceitos, assim como a análise e interpretação dos resultados. Crê-se, no entanto, que é possível facilitar o processo de construção do conhecimento para a integração do conjunto das informações disponíveis sobre cada uma das tecnologias potencialmente utilizáveis para a composição de sistemas térmicos a partir da proposição de uma disciplina com tal objetivo.

3. UMA PROPOSTA PEDAGÓGICA

Elaborar a configuração (ou arranjo) de um sistema de geração de energia implica em saber harmonizar a junção de diferentes componentes (máquinas térmicas, trocadores de calor, unidades de processo, equipamentos auxiliares e de controle, dentre outros) de modo a que o resultado final atenda às necessidades propostas para o projeto. Buscar a estruturação de uma seqüência de rotinas que possibilite uma adequada proposição de arranjos de máquinas, respeitadas as restrições físicas (atendimento da segunda lei da Termodinâmica, conservação de massa e energia) e as condições básicas do projeto, é a meta perseguida por quem se habilita a propor uma metodologia de projeto.

O estudo das máquinas térmicas e dos sistemas energéticos obtidos a partir delas deve ser posterior à aquisição dos conhecimentos de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica, uma vez que tais conceitos já devem estar estabelecidos para que sejam aplicados na interpretação dos processos em análise. Dessa forma, um curso de Máquinas Térmicas nos moldes aqui preconizados deve ter por conteúdo:

- 1) Revisão de Termodinâmica
- 2) Combustíveis e Combustão
- 3) Conceitos de síntese
- 4) Ciclos a vapor: aspectos do ciclo; caldeiras; turbinas a vapor; composição de sistemas;
- 5) Ciclos a gás: aspectos do ciclo; compressores; turbinas a gás; composição de sistemas;
- 6) Ciclos com motores de combustão interna: aspectos do ciclo; tecnologia de motores; ciclos combinados (vapor/gás/combustão interna); composição de sistemas;
- 7) Ciclos de refrigeração: aspectos dos ciclos; tecnologias existentes; composição de sistemas.

A revisão dos conceitos de Termodinâmica deve ser breve, o suficiente para resgatar o conhecimento adquirido; o estudo de combustíveis e combustão deve ser em nível suficiente para a compreensão dos fenômenos que serão desenvolvidos no curso, ao passo que o item (3) é de grande relevância para uma efetiva consecução dos objetivos do curso. Nos itens de (4) a (7) devem ser estabelecidas as condições operacionais de cada componente, individualmente, e sua associação com os demais para a proposição de configurações que se destinam a atender necessidades energéticas. Fica claro, dessa forma, que a proposta aqui apresentada para um curso de Máquinas Térmicas não pode ser entendida como um curso de Termodinâmica "reforçado".

Os objetivos do estudo das Máquinas Térmicas devem envolver alguns pontos importantes, a saber:

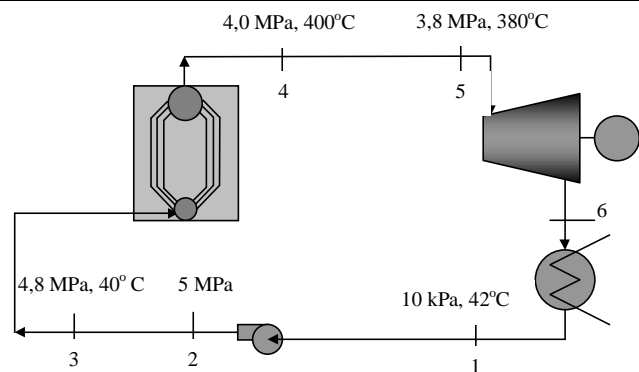
- as **avaliações do curso** (Provas e Testes) devem visar a aferição do progresso do estudante com respeito às seguintes *atitudes desejáveis*:
 - conhecimento das tecnologias envolvidas com a composição de sistemas de geração de energia que emprega máquinas e equipamentos térmicos;
 - apropriação de uma boa noção com respeito à capacidade de geração dos componentes individuais e dos sistemas formados por meio deles (isto é, um “sentimento” acerca da adequação de valores propostos e resultados de sua análise ao problema em estudo);
 - facilidade para a **composição** das Máquinas Térmicas de modo a **configurar sistemas** que atendam às necessidades energéticas sugeridas nos problemas propostos.
- o "sentimento" adquirido na disciplina diz respeito não apenas à necessidade do estudante sentir-se confiante na aplicação dos modelos físicos e matemáticos a que a Engenharia faz uso, mas sabedor das suas limitações. O modelo físico aproxima a realidade, mas apresenta uma distância em relação a esta; entretanto, é preferível utilizar-se dos modelos físicos para garantir-se uma aproximação da realidade a simplesmente utilizar-se um valor qualquer (o famoso "chute") como verdadeiro. A esse respeito, vale generalizar para outros modelos físicos o conceito expresso no título do artigo de Geofrion (1976), "*The purpose of mathematical programming is insight, not numbers*".
- como em tudo na Engenharia, não existe problema “fechado”: cada indivíduo pode propor uma solução, mas deve fazê-lo sempre considerando a melhor técnica, buscando obter um resultado pautado em custos e retornos adequados, minimizando os impactos ambientais, respeitando normas pertinentes ao projeto, restrições de disponibilidade de recursos, dentre outros.
- estudante deve estar consciente de que futuramente chegará no seu local de trabalho sem que tenha sobre sua mesa uma folha descrevendo com detalhes os problemas que deverá enfrentar naquele dia, nem mesmo com indicações comuns no dia-a-dia estudantil, tais como informações apresentadas a título de sugestão ou "dicas" para a solução do problema, a saber: que a massa específica do ar em certa condição é $1,2 \text{ kg/m}^3$ ou se o modelo de gás perfeito se aplica ou não em certo caso, tal como é comum em provas ou rodapé dos exercícios mais elaborados de livros.
- por fim, na Termodinâmica ensinam-se as leis que regem os fenômenos energéticos e os alunos devem ser avaliados quanto ao domínio dessas leis que estão envolvidas; em geral, os problemas são apresentados com todos os valores necessários, ou com possibilidade de o serem mediante a aplicação dos conceitos e formulações adquiridas na disciplina, cabendo portanto ao estudante calcular os valores não disponíveis e exercitar o domínio das equações. Na disciplina Máquinas Térmicas, as leis e equações termodinâmicas são admitidas como conhecidas, os problemas são abertos, pretendendo-se verificar se as tais atitudes desejáveis são alcançadas.

A título de exemplo, apresentam-se dois problemas entendidos como típicos das disciplinas Termodinâmica e de Máquinas Térmicas, de forma a ilustrar a discussão precedente:

PROBLEMA TÍPICO DE TERMODINÂMICA

Dadas as condições do ciclo a vapor descrito na figura ao lado, calcule:

- o calor por unidade de massa fornecido ao fluido;
- o trabalho por unidade de massa produzido na turbina;
- a eficiência térmica do ciclo.



PROBLEMA TÍPICO DE MÁQUINAS TÉRMICAS

Um processo industrial consome 2,5 kg/s de vapor a 1,5 MPa e 270°C no processo A; 2,0 kg/s de vapor a 0,4 MPa e 180°C no processo B; e 2.000 kW de potência mecânica. Proponha um ciclo a vapor com características comerciais e que atenda às necessidades do processo com atendimento preferencial às demandas térmicas (paridade térmica).

4. PONTOS IMPORTANTES A PONDERAR

A situação anteriormente apresentada a título de exemplo de um problema típico de Máquinas Térmicas diz respeito à necessidade de definição de dois níveis energéticos de vapor (em termos de pressão e temperatura, por exemplo) e correspondentes vazões, bem como potência mecânica, sendo aqui resgatada para ilustrar questões pertinentes de serem observadas com respeito à proposta metodológica apresentada.

A configuração apresentada na Fig. 2 ilustra uma das possíveis propostas de atendimento às necessidades da unidade de processo, estabelecida a partir da definição das necessidades energéticas do processo; a caldeira deve ser necessariamente aquatubular em decorrência do nível de pressão considerado, e dimensionada para produzir 4,5 kg/s de vapor vivo com pressão² superior ao conteúdo energético do processo A, e suficientes para garantir uma queda de entalpia que justifique técnica e economicamente a presença da turbina a vapor na configuração (Balestieri, 2002).

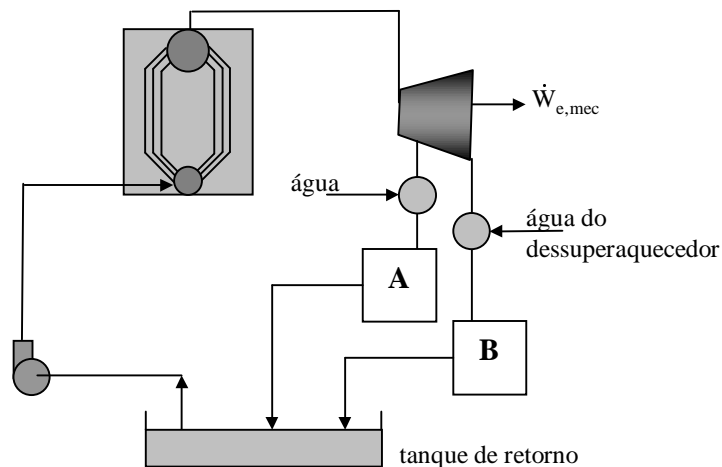


Figura 2. Configuração de ciclo a vapor proposta para atender às necessidades especificadas

Alguns comentários devem ser feitos com relação à configuração proposta:

- não há, nesse esquema, possibilidade de modulação das vazões consumidas pelos processos A e B; a potência mecânica é produzida na proporção da vazão de vapor que passa na turbina e dessa forma variações nas demandas de vapor dos processos A ou B envolvem a modulação de carga na caldeira para ajuste de sua capacidade de produção e representam variação na potência mecânica gerada.

Para essa situação, se A e B são processos independentes, pode acontecer de um deles ser interrompido num certo momento; a caldeira tem de “perceber” esse detalhe e modular a queima para a nova situação. Deve-se considerar que a operação da caldeira em carga parcial não é sua condição mais eficiente, além do fato de haver um período de transitório em que o sistema como um todo deve acomodar o excesso de vapor produzido ou expandi-lo para a atmosfera. Nesses casos, a substituição da turbina de contrapressão e extração da Fig. 2 por outra de condensação e extração traria como

² Valores comerciais são 2,0 MPa/300°C, 4,0 MPa/350°C, 6,0 MPa/400°C com variantes na condição de temperatura.

vantagem a possibilidade de se fazer a modulação necessária, ainda que parcial em função das características próprias do equipamento, além de apresentar maior capacidade de produção de energia pelo fato de o nível de pressão de saída nesse equipamento ser muito inferior ao daquele apresentado pela turbina de contrapressão.

- Caso se defina que o vapor vivo gerado na caldeira apresente por estado termodinâmico 2,1 MPa e 300°C (o que corresponde a entalpia de 3021 kJ/kg e entropia de 6,74 kJ/kgK), com o processo A apresentando entalpia de 2969 kJ/kg e entropia de 6,7935 kJ/kgK enquanto o processo B conta com entalpia de 2817 kJ/kg e entropia de 7,0743 kJ/kgK, revela-se que a proposta está coerente com os conceitos termodinâmicos da 2ª Lei, ou seja, com a expansão na turbina ocorre uma redução na capacidade energética do vapor (a queda na entalpia) ao mesmo tempo em que se observa um aumento da entropia; no diagrama T-s isso poderia ser representado conforme Fig. 3.

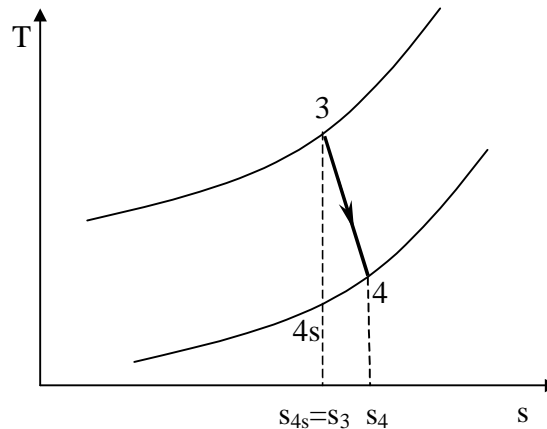


Figura 3. Representação do aumento entrópico na expansão do ciclo a vapor

Os valores apresentados também permitem calcular a eficiência do equipamento e estimar a potência gerada pela turbina a vapor, que é de cerca de 540 kW, valor insuficiente para as necessidades da unidade de processo. Entretanto, caso o resultado apresentasse valor superior ao necessário, seria preciso analisar a viabilidade econômica da oferta da energia excedente para a rede da concessionária local.

- a extração de vapor deve ser feita num ponto específico da turbina, correspondente ao nível de pressão desejada, de acordo com as características de queda de pressão no interior dos estágios, do tipo de rotor, etc., como se verá em item a seguir. Com isso, não se pode garantir que a pressão e a temperatura do vapor nas extrações sejam, simultaneamente, os valores correspondentes às demandas para as quais estão sendo efetuadas; desse modo, pode ser necessário corrigir o nível de temperatura do vapor através de dessuperaquecedores.

O dessuperaquecimento pode ser feito a partir do borrafo de água na linha de vapor (o que traz como desvantagem o aumento da vazão em massa) ou por meio da inserção de trocadores de calor (o que nem sempre é possível pelas restrições de espaço físico e disponibilidade de fluxos térmicos compatíveis para a troca térmica).

É importante também esclarecer que quando um sistema térmico é composto de modo a disponibilizar potência elétrica, considerações de **interdisciplinaridade** estão presentes, e algumas medidas devem ser levadas em conta no seu projeto; é importante que o engenheiro mecânico se sinta à vontade ao passar da ponta do eixo da máquina térmica em direção ao gerador elétrico, o mesmo valendo em caminho inverso para o engenheiro eletricitista.

Do ponto de vista da interface entre o sistema térmico e a rede elétrica, há que se considerar que:

- o acoplamento do eixo do sistema de geração (uma turbina ou motor) ao eixo do gerador elétrico se faz mediante engate direto ou por meio de caixa de redução, dependendo em cada caso da rotação apresentada pelo primeiro durante sua operação;
- para interligação de um sistema de geração à rede de distribuição elétrica ("paralelismo") é preciso que a energia elétrica seja gerada com a mesma frequência da rede - no Brasil a frequência padrão é de 60 Hz e em muitos países é de 50 Hz. Desse modo, é preciso conhecer o gerador elétrico que será associado ao sistema de geração, uma vez que a relação

$$f = \frac{PN}{60}$$

deve ser atendida, na qual f é a frequência (Hz), P o número de pares de pólos do gerador elétrico, N (rpm) é a rotação do eixo do gerador e 60 é o fator de conversão de rpm para rps. Para a frequência da rede de 60 Hz, o atendimento da expressão para um gerador com um par de pólos ocorre com rotação de 3600 rpm e para dois pares de pólos a rotação deve ser de 1800 rpm. A Fig. 4 ilustra o corte de um gerador elétrico trifásico com um par de pólos no rotor, em que se identificam os enrolamentos de cobre do estator e do rotor e nos quais ocorrem os fenômenos eletromagnéticos.

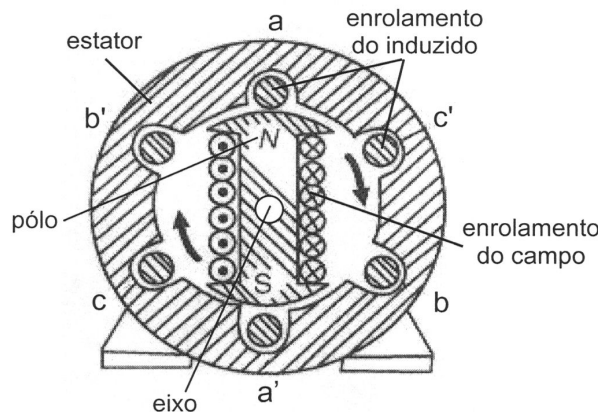


Figura 4. Corte de um gerador elétrico com um par de pólos

5. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Neste trabalho procurou-se resgatar conceitos normalmente dispersos ao longo das disciplinas fundamentais da área térmica com vistas a identificarem-se os elos que as tornam solidárias, e dessa forma evidenciar os vínculos indissociáveis que fazem do seu conjunto um elemento coeso, mas que não necessariamente é perceptível ao estudante quando de sua formação. Nesse sentido, um curso de Máquinas Térmicas, nos moldes aqui preconizados, seria útil para a conexão desses conceitos.

No entendimento dos autores, o desenvolvimento dos conteúdos para um curso de Máquinas Térmicas, dentro de uma abordagem que privilegie o inter-relacionamento das disciplinas fundamentais da área térmica, das demais disciplinas formadoras, assim como das disciplinas de outras áreas do conhecimento, deve proporcionar ao estudante uma visão mais abrangente de projetos que partem das necessidades de um dado empreendimento para um sistema integrado. Tal percepção encontra-se suportada pelos conceitos de síntese e modelagem, na busca de soluções que indiquem as melhores propostas dentre as possivelmente encontradas.

6. REFERÊNCIAS

- Asimov, M. , 1968, "Introdução ao projeto de engenharia", Ed. Mestre Jou, São Paulo, Brasil.
- Balestieri, J.A.P., 2002, "Máquinas térmicas - material de apoio à disciplina", Brochura, UNESP - Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil.
- Baines, N.C., Crane, R.I., Gibbins, J.R., 1991, "Power plant and systems - an incremental approach to a final-year course", Journal of Power and Energy (Part A), Vol 205, pp. 53-57.
- Couvillion, R.J., 1986, "Computer usage in a thermal systems design course", International Journal Applied Engineering Education, Vol. 2, No. 3, pp. 167-173.
- Forbus, K.D. et al., 1999, "CyclePad: An articulate virtual laboratory for engineering thermodynamics", Artificial Intelligence, Vol. 114, pp. 297-347.
- Geofrion, A. M., 1976, "The purpose of mathematical programming is insight, not numbers", Interfaces, Vol. 7, No. 1, pp. 81-92.
- Koda, E.,Takahashi, T., 2002, "Development of general-purpose software to analyze the steady state of power generation systems",Energy Conversion and Management, Vol. 43, pp. 1407-1416.
- Manninen, J., Zhu, X.X, 1999, "Optimal flowsheeting synthesis for power station design considering overall integration", Energy, Vol. 24, pp. 451-478.
- Sciubba, E., 1998, "Toward automatic process simulators: Part I - modular numerical procedures", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 120, No. 1, pp. 1-8.

7 . DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Discussion of an educational method for a "Thermal Systems" course

José Antônio Perrella Balestieri

UNESP – Campus de Guaratinguetá, Av. Ariberto P. Cunha, 333- 12516-410- Guaratinguetá, SP
perrella@feg.unesp.br

Rubens Alves Dias

UNESP - Campus de Guaratinguetá, Av. Ariberto P. Cunha, 333- 12516-410- Guaratinguetá, SP
GSI– Engenharia e Consultoria Ltda., Rua Mato Grosso, 120 - 12062-120 - Taubaté, SP
rubdias@zipmail.com.br

Abstract: *The basis for thermal field in a Mechanical Engineering course is Fluid Mechanics, Thermodynamics and Heat Transfer lectures, but also additional complementary courses are given as obligatory or elective according to the College pedagogic proposal. The set of disciplines are constituted to present concepts or general information about several energetic and technological subjects. Although the efforts done by thermal field instructors for adequately diffusing the concepts expressed in their disciplines, problems for transposing theoretical problems to the practice can be perceived, not only by difficulties in expressing theoretical cycles in terms of real cycles but also because applying 2nd law of Thermodynamics is not a common practice even for several instructors. Thermal cycles associated to energy generating systems and the technology associated to the construction and performance of thermal machines can be given to the students from the general to specific problem viewpoint, or vice-versa. In this paper a pedagogic approach is proposed based on the presentation/discussion of each thermal machine, in terms of its design and operational characteristics, in an adequately sequence for presenting their composition in a thermal system.*

Keywords: *thermal machines, pedagogic approach, systems analysis.*