



Anais do XXXIV COBENGE. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, Setembro de 2006.
ISBN 85-7515-371-4

METODOLOGIA NO ENSINO DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE VOLTADA AOS ALUNOS DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Tapan Kumar Sen – tapan@unifei.edu.br

Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Instituto de Engenharia Mecânica
Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho
37500-903 – Itajubá - MG

Maris Stela C. Silveira – mstela@unifei.edu.br

Instituto de Engenharia Mecânica

Eduardo K. K. Navarro – edu_kawai@yahoo.com.br

Graduando Curso de Engenharia de Produção e Gestão

Lucas B. Alves – lucbaral@yahoo.com.br

Graduando Curso de Engenharia de Produção e Gestão

Resumo: *Este artigo relata uma visão diferenciada voltada aos alunos do curso de Engenharia de Produção/Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, dentro da disciplina de Fenômenos de Transporte, com o intuito de colocar em prática os conceitos adquiridos em sala de aula. Para o desenvolvimento de habilidades e assimilação de conhecimentos, abrangendo aspectos essenciais da área de Produção, temas foram apresentados pelo professor e a turma dividida em grupos. O trabalho em questão apresenta o desenvolvimento de técnicas computacionais relacionando a teoria e a prática, onde além dos aspectos técnicos da Termodinâmica, foram desenvolvidos conceitos econômicos importantes. Para a realização do mesmo, a equipe teve o livre arbítrio da escolha do ambiente de programação. O Programa Visual Basic, devido à praticidade e dinamicidade, foi o escolhido pelo grupo. A proposta do trabalho foi o desenvolvimento de uma rotina onde a viabilidade da instalação de uma central com turbina a gás pode ser analisada e avaliada através do cálculo do custo total por unidade de energia produzida.*

Palavras-chave: *Termodinâmica, Programação, Turbina a gás, Potência, Custo total.*

1. INTRODUÇÃO

A disciplina Fenômenos de Transporte, ministrada aos estudantes dos Cursos de Engenharia da Universidade Federal de Itajubá, tem sido elaborada focada conforme os diferentes cursos da Instituição. No caso específico deste trabalho, será apresentada uma dinâmica realizada com a Turma do Curso de Engenharia de Produção onde o objetivo foi o

de motivar e despertar no aluno o interesse pela disciplina. Atividades foram propostas e os alunos, divididos em equipes sob o olhar atento do docente, puderam desenvolver algumas habilidades, tais como capacidade de argumentação, questionamento, liderança e flexibilidade. O tema abordado por esta equipe em questão relatará o procedimento para o cálculo do custo total por unidade de energia, verificando a viabilidade da implantação de uma central energética movida por uma turbina a gás operando num ciclo fechado. Uma rotina computacional foi elaborada para simular a influência das variáveis decisivas para a construção dessa central energética.

Esse tema, além de abranger sólidos conhecimentos da Termodinâmica, abrange também conhecimentos econômicos de grande importância para os futuros Engenheiros de Produção.

Para uma maior fidelidade foram pesquisadas, em revistas especializadas, as turbinas a gás mais utilizadas para essa finalidade sendo obtidos resultados satisfatórios.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Modelo Teórico

As máquinas térmicas que se baseiam no ciclo Brayton são denominadas turbina a gás, podendo trabalhar em ciclo aberto ou ciclo fechado. O ciclo aberto é mais comum, onde o ar atmosférico é continuamente arrastado para um compressor onde é comprimido até uma pressão mais elevada. O ar então entra em uma câmara de combustão, onde é misturado com o combustível, e a combustão ocorre, resultando em produtos de combustão a uma temperatura elevada. Os mesmos se expandem através da turbina e são, em seguida, descarregados nas vizinhanças.

A utilização de uma turbina a gás trabalhando num ciclo fechado é relativamente vantajosa devido à versatilidade na escolha do fluido de trabalho (ar, argônio, hélio, metano, propano, entre outros). Ao contrário do ciclo aberto, no ciclo fechado o fluido escolhido recircula no sistema, onde é aquecido a alta pressão e resfriado a baixa pressão. O esquema do ciclo Brayton fechado, com os acessórios térmicos necessários, é dado pela “Figura 1”.

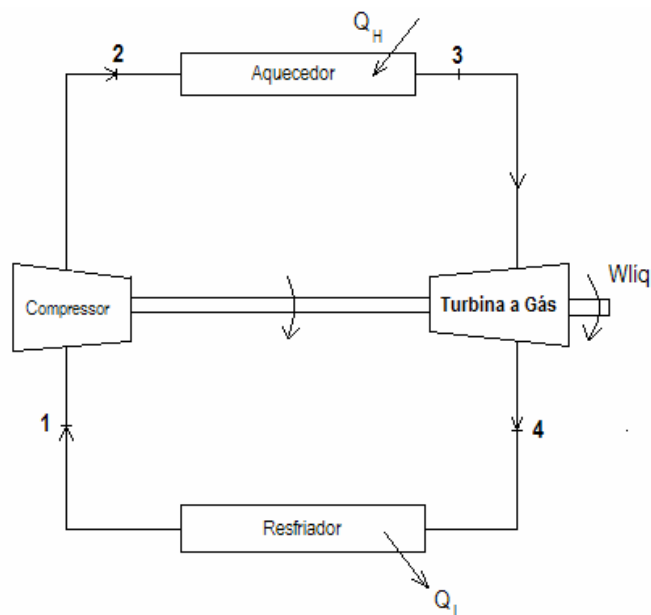


Figura 1 – Turbina a gás - Ciclo Brayton (ciclo fechado)

Onde:

- 1) Entrada no compressor / Saída do resfriador;
- 2) Saída do compressor / entrada no aquecedor;
- 3) Saída do aquecedor / entrada da turbina;
- 4) Saída da turbina / entrada do resfriador;

Q_H = Calor fornecido ao sistema;

Q_L = Calor rejeitado pelo sistema;

W_{liq} = Trabalho líquido ($W_{turb} - W_{comp}$).

Para um ciclo de Brayton (fechado) operando de uma forma ideal, temos as seguintes hipóteses:

- a) Cada acessório térmico (aquecedor, turbina, resfriador e compressor) é analisado como o volume de controle em regime permanente;
- b) Processos na turbina e compressor são isentrópicos;
- c) Não existe perda de carga nos escoamentos através dos trocadores de calor (aquecedor e resfriador);
- d) Efeitos da energia cinética e potencial são desprezados;
- e) O fluido de trabalho é modelado como um gás ideal.

Para a implementação desse software, será considerada uma situação real, não ideal. Ocorrerá perda de carga devido ao escoamento do fluido (durante a passagem pelo aquecedor) e a temperatura na entrada da turbina (T_3) será máxima, que por motivos metalúrgicos não poderá ultrapassar 1600°C, necessitando um controle da temperatura.

2.2. Modelo Matemático I

Na primeira parte, será calculado o rendimento térmico do sistema, supondo uma perda de carga na passagem pelo aquecedor e uma temperatura máxima na entrada da turbina (T_3).

Será feita a análise dos acessórios térmicos como se fossem superfícies e controle.

$$\text{COMPRESSOR} \begin{cases} \omega_c = h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1) \\ s_{2s} = s_1 \end{cases} \quad (1)$$

Onde h_1 e h_2 são as entalpias específicas na entrada e na saída do compressor, respectivamente, C_p é o calor específico à pressão constante, que depende do fluido de trabalho, s_1 é a entropia específica na entrada e s_{2s} é a entropia específica ideal na saída do compressor.

T_1 e T_{2s} são as temperaturas ideais na entrada e na saída do compressor, respectivamente.

Pela relação isentrópica, temos:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \frac{T_{2s}}{T_1} \Rightarrow T_{2s} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (2)$$

Onde P_1 é a pressão na entrada do compressor, e T_{2s} e P_2 são a temperatura ideal e a pressão na saída do compressor, respectivamente. O K é o índice isentrópico, característica do fluido utilizado.

Da definição do rendimento do compressor (η_C):

$$\eta_C = \frac{h_{2S} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2S} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = \left(\frac{T_{2S} - T_1}{\eta_C} \right) \quad (3)$$

Onde h_1 é a entalpia específica na entrada do compressor e h_{2S} é a entalpia específica ideal (isentrópica) na saída do compressor.

Levando (2) em (3):

$$T_2 = \left\{ \frac{\left[T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] - T_1}{\eta_C} \right\} + T_1 \quad (4)$$

Da definição de trabalho de um compressor (ω_C):

$$\omega_C = C_p (T_2 - T_1) \quad (5)$$

Levando (4) em (5):

$$\omega_C = C_p \left\{ \frac{\left[T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] - T_1}{\eta_C} \right\} \quad (6)$$

Estendendo os conceitos básicos para a turbina a gás:

$$\text{TURBINA} \begin{cases} \omega_T = h_3 - h_4 = C_p (T_3 - T_4) \\ s_3 = s_{4S} \end{cases} \quad (7)$$

Onde h_3 e h_4 são as entalpias específicas na entrada e na saída da turbina, respectivamente, s_3 é a entropia específica na entrada da turbina e s_{4S} é a entalpia específica ideal na saída da turbina.

No caso, havendo uma queda de pressão (${}_2\Delta P_3$) entre a entrada e a saída do aquecedor, temos:

$${}_2\Delta P_3 = P_2 - P_3 \rightarrow P_3 = P_2 - {}_2\Delta P_3 \quad (8)$$

Onde P_2 e P_3 são as pressões na entrada e na saída do aquecedor, respectivamente. Pela relação isentrópica:

$$\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \frac{T_3}{T_{4S}} \quad (9)$$

Onde T_{4S} é a temperatura ideal na saída da turbina.
Mas $P_4 = P_1$, logo:

$$T_{4S} = T_3 \left(\frac{P_1}{P_3}\right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (10)$$

Levando (8) em (10):

$$T_{4S} = T_3 \left(\frac{P_1}{P_2 - \Delta P_3}\right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (11)$$

Da definição do rendimento da Turbina (η_T):

$$\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \Rightarrow T_4 = T_3 - \eta_T (T_3 - T_{4s}) \quad (12)$$

Onde h_3 é a entalpia específica na entrada da turbina, h_4 e h_{4s} são as entalpias real e ideal na saída da turbina, respectivamente.

Levando (11) em (12):

$$T_4 = T_3 - \eta_T \left\{ T_3 - \left[T_3 \left(\frac{P_1}{P_2 - \Delta P_3} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \right\} \quad (13)$$

Da definição de trabalho de uma Turbina (W_T):

$$\omega_T = C_p (T_3 - T_4) \quad (14)$$

Levando (13) em (14), temos:

$$\omega_T = C_p \left[\eta_T \left\{ T_3 - \left[T_3 \left(\frac{P_1}{P_2 - \Delta P_3} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \right\} \right] \quad (15)$$

Da definição de trabalho líquido (ω_{liq}):

$$\omega_{liq} = \omega_T - \omega_C \quad (16)$$

Substituindo (6) e (15) em (16):

$$\omega_{liq} = C_p \left[\eta_T \left\{ T_3 - \left[T_3 \left(\frac{P_1}{P_2 - \Delta P_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \right\} \right] - C_p \left\{ \frac{\left[T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] - T_1}{\eta_c} \right\} \quad (17)$$

Para o Aquecedor, o calor fornecido ao sistema (q_H) é definido por:

$$q_H = h_3 - h_2 = C_p (T_3 - T_2) \quad (18)$$

Onde h_2 e h_3 são as entalpias de entrada e saída do aquecedor ou saída do compressor e entrada da turbina, respectivamente.

Substituindo (4) em (18):

$$q_H = C_p \left(T_3 - \left[\frac{\left[T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] - T_1}{\eta_c} \right] + T_1 \right) \quad (19)$$

Finalmente, se $\eta_t = \frac{\omega_{liq}}{q_H}$ (Rendimento térmico do ciclo), substituímos (17) e (19), encontramos:

$$\eta_t = \frac{\left[C_p \left[\eta_T \left\{ T_3 - \left[T_3 \left(\frac{P_1}{P_2 - \Delta P_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \right\} \right] - C_p \left\{ \frac{\left[T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] - T_1}{\eta_c} \right\} \right]}{C_p \left(T_3 - \left[\frac{\left[T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] - T_1}{\eta_c} \right] + T_1 \right)} \quad (20)$$

2.3. Modelo Matemático II

Partindo de dados pré-conhecidos como o custo unitário, da potência máxima (P_{MAX}), do tempo de construção (t_{con}) e de operação (t_{op}), da taxa de juros anuais (i, j), do rendimento térmico (η_t), do fator de carga (FC) e da taxa de juros pagos trimestralmente (m, n, p), pode-se partir para a avaliação de investimento (Planta e Potência) na geração de potência.

O custo total será dado por:

$$Custo\ total = Custo\ capital + Custo\ de\ operação\ e/ou\ manutenção + Custo\ combustível \quad (21)$$

A seguir seguem os cálculos de cada parcela referente ao custo total.
O custo combustível (C_f) por kWh em termos X\$ por milhão de kJ é dado por:

$$C_f = \left[\frac{X}{MkJ} \frac{MkJ}{277,8kWh} \right] \frac{1}{\eta_t} \left[\frac{US\$}{kWh} \right] \quad (22)$$

Para o cálculo referente ao custo de operação/manutenção serão necessários o conhecimento do número de operários envolvidos na operação/manutenção da planta (N) e o salário médio anual (SMA) do trabalhador. O custo unitário trabalhador/energia unitária (Cut) é dado por:

$$Cut = \frac{N SMA \left(\frac{US\$}{ano} \right)}{P_{MAX} FC (kW)} = \frac{N SMA \left(\frac{US\$}{ano} \frac{ano}{8766h} \right)}{P_{MAX} FC (kW)} = \frac{N SMA (1,14 \times 10^{-4})}{P_{MAX} FC (kW)} \left[\frac{US\$}{kWh} \right] \quad (23)$$

Para a determinação do Custo capital por kWh, calculou-se inicialmente o custo de construção:

$$\frac{\text{Pagamento de construção}}{\text{Trimestre}} = C_{con} = \frac{(\text{Custo unitário})P_{MAX}}{p \cdot t_{con}} \left[\frac{US\$}{\text{trimestre}} \right] \quad (24)$$

Onde C_{con} é o custo de construção (incremental) [US\$ / trimestre] pago p vezes por ano durante o período de construção de t_{con} [ano].

Posteriormente passou-se ao calculo do valor presente no final da construção V_p (US\$):

$$V_p = \left[\frac{\left(\left(1 + \frac{j}{m} \right)^{m \cdot t_{con}} - 1 \right)}{\frac{j}{m}} \right] C_{con} \left[\frac{US\$}{\text{trimestre}} \right] \quad (25)$$

De posse do valor de V_p (Valor presente principal ou quantia atual no final da construção) pode-se calcular C_{cap} (valor futuro (US\$) do investimento atual depois do período de operação, t_{op}):

$$C_{cap} = V_p \left[1 + \frac{i}{n} \right]^{n \cdot t_{op}} [US\$] \quad (26)$$

E o custo capital é dado por:

$$C_{cap} = \left[\frac{\left(1 + \frac{i}{m}\right)^{m \cdot t_{op}} - 1}{\frac{i}{m}} \right] C_{inv} \quad [US\$] \quad (27)$$

C_{inv} é o custo de investimento (capital) pago/trimestre ou pagamento regular trimestral necessário para alcançar o custo capital, da equação acima tem-se:

$$C_{inv} = \frac{C_{cap}}{\left[\frac{\left(1 + \frac{i}{m}\right)^{m \cdot t_{op}} - 1}{\frac{i}{m}} \right]} \quad \left[\frac{US\$}{trimestre} \right] \quad (28)$$

A energia produzida por trimestre (E_t) é dada por:

$$E_t = P_{MAX} \cdot FC \quad [tempo \text{ por trimestre}] \quad (29)$$

Transformando para $[kWh/trimestre]$:

$$E_t = P_{MAX} \cdot FC \cdot 2191,5 \quad [kWh/trimestre] \quad (30)$$

Por fim com os valores de C_{inv} e de E_t , pode-se calcular o valor do custo capital, C_{cap} , do investimento por kWh :

$$C_{cap} = \frac{C_{inv}}{E_t} \quad [US\$/kWh] \quad (31)$$

O Custo total por kWh de acordo com a “equação (1)” será dado por:

$$C_t = C_{cap} + C_{ut} + C_f \quad [US\$/kWh] \quad (32)$$

Como todos os custos são expressos em dólares americano, há a necessidade de transformar o custo total para valores em reais, onde R é a cotação do dólar em Real. Assim:

$$C_{t(R\$)} = C_t \cdot R \quad [R\$/kWh] \quad (33)$$

2.4. Software de Simulação:

O Software foi desenvolvido em Visual Basic, sendo necessário os seguintes dados para a realização dos cálculos, referente ao Modelo Matemático I:

- Rendimento do Compressor (η_c) em porcentagem;
- Rendimento da Turbina (η_T);
- Pressão na entrada (P_1) e saída (P_2) do Compressor;
- Queda de Pressão na passagem pelo Aquecedor (${}_2\Delta P_3$);
- Temperatura na entrada do Compressor (T_1);
- Temperatura na entrada da Turbina (T_3);
- Gás utilizado.

Os dados acima são utilizados para o cálculo do Rendimento Térmico (η_T). O Custo Total será calculado, sendo necessários os seguintes dados, referentes ao Modelo Matemático II:

- Custo Unitário (depende do valor do Rendimento Térmico);
- Potência Máxima (P_{MAX});
- Tempo de Construção (t_{con}) e Operação (t_{op});
- Preço do Combustível (X);
- Fator de Carga (FC);
- Salário Médio Anual dos trabalhadores (SMA);
- Número de Trabalhadores (N);
- Taxa de Câmbio (R).

Após a realização dos cálculos, o Software retorna os seguintes valores:

- Rendimento Térmico e Custo Unitário;
- Energia Produzida por trimestre;
- Custo de Construção;
- Custo de Investimento;
- Custo de Combustível por kW ;
- Custo de Operação/Manutenção;
- Custo de Capital;
- Custo Total (em $US\$$ e $R\$$ por kWh).

O software permite simulações com os diversos tipos de turbinas a gás presentes no mercado; isso se faz possível pelo valor do custo unitário calculado na primeira parte do programa (para um rendimento térmico específico, tem-se um valor para o custo unitário, diferenciando cada tipo dessas turbinas). Um esquema simplificado foi utilizado, “Figura 2”, orientando o operador do programa nos diversos pontos da central energética. O programa está ilustrado conforme “Figura 2” e “Figura 3”.

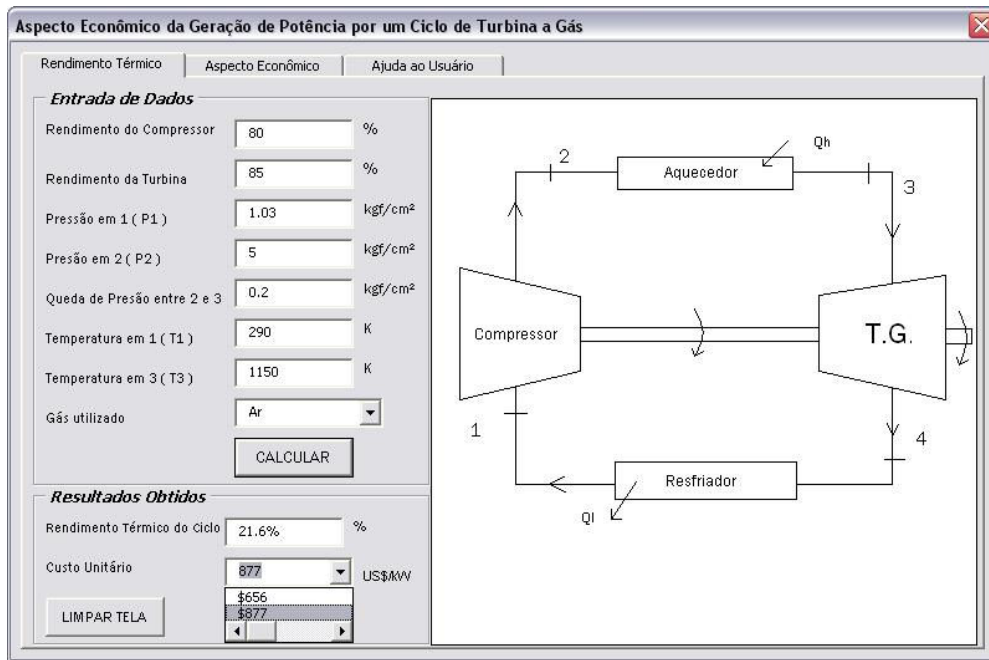


Figura 2 – Rendimento Térmico – Modelo Matemático I

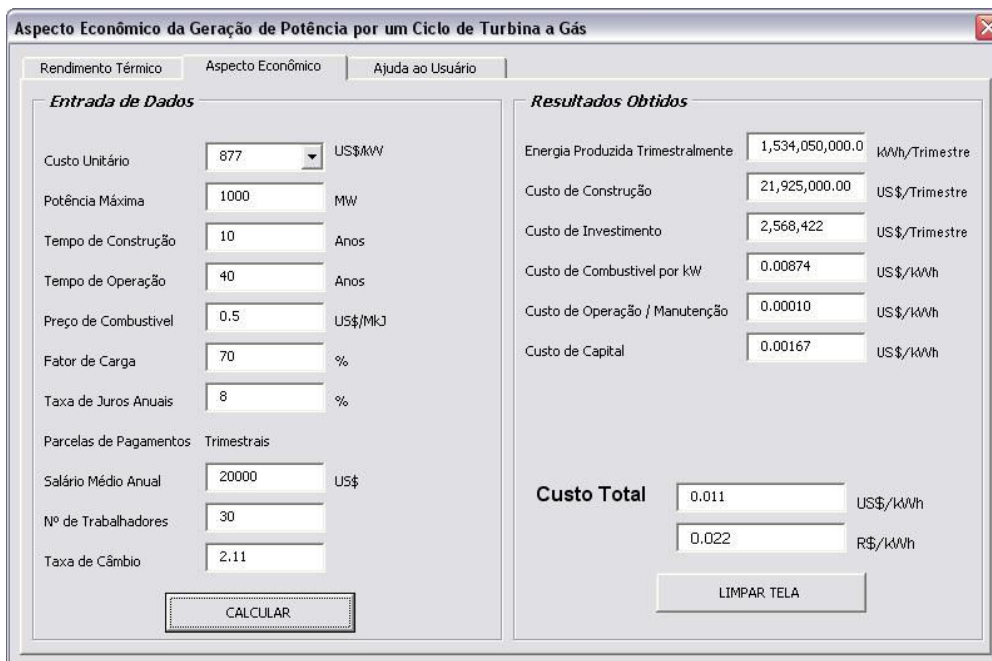


Figura 3 – Aspecto econômico – Modelo Matemático II

Outra característica dessa rotina é a tela de “Ajuda ao Usuário”, onde se encontram instruções básicas para a operação do programa, “Figura 4”.

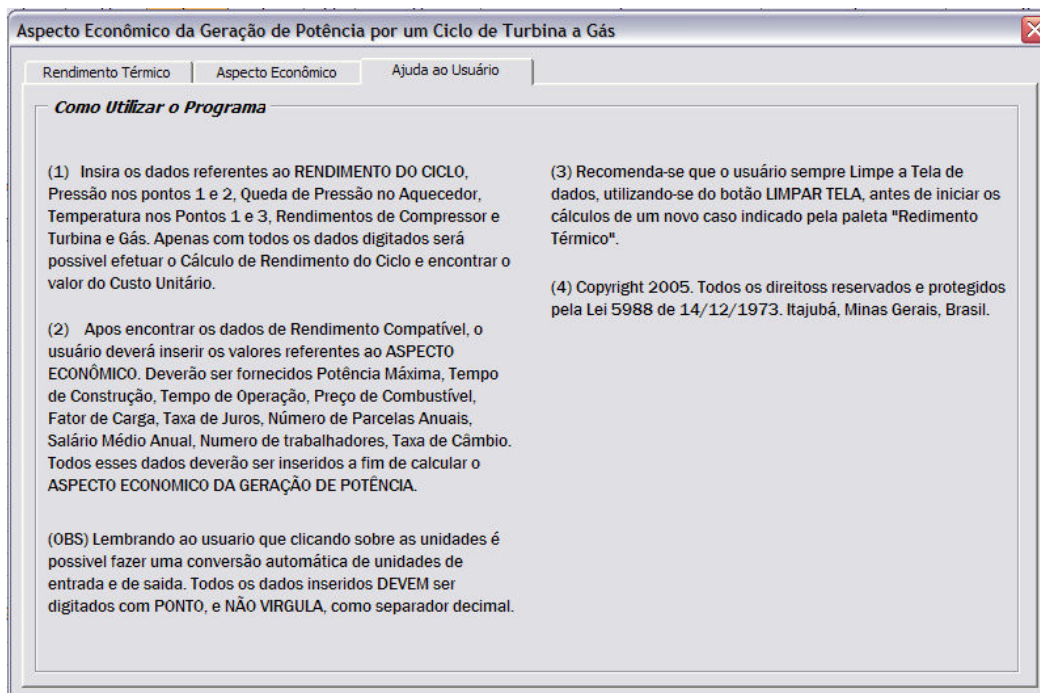


Figura 4 – Ajuda ao Usuário

3. COMENTÁRIOS

As turbinas a gás apresentam vantagens em relação às turbinas a vapor, pela razão de não precisarem de uma instalação (grande e cara) para a produção de vapor, rapidez de funcionamento, não necessitam de água, não utilizam condensador, escape limpo, menor número de equipamentos auxiliares e menor relação peso-potência. As turbinas a gás são acionadas pelos próprios gases quentes, produto da combustão, o que dispensa a utilização de um fluido de trabalho intermediário, como o vapor, ou outro fluido. Isto leva a unidades mais compactas, para os mesmos níveis de produção de potência.

Verifica-se a partir da análise do desenvolvimento matemático e de simulações provenientes do software, que um dos fatores que contribuem de forma decisiva para a diminuição do custo da geração de potência é a *potencia máxima* desenvolvida pela turbina. Quanto maior for a potência máxima, mais barato será o custo total por kWh; uma vez que tal grandeza é inversamente proporcional ao custo de operação/manutenção e ao custo capital, apenas influenciando no sentido de encarecer o custo nos valores referentes ao custo de construção.

Uma das maneiras possíveis que acarretariam num aumento da geração de potência seria a otimização de variáveis fundamentais de projeto, tais como: a razão de compressão no compressor, relação ar/combustível, a temperatura de entrada dos gases quentes na turbina de potência, entre outras.

Outra variável que influencia de forma direta na redução dos custos é o rendimento térmico. Quanto maior o rendimento térmico menor será o custo combustível e conseqüentemente menor será o custo total.

Cabe ressaltar, que fatores de ordem econômica, como a taxa de juros e o salário médio anual pago aos trabalhadores na manutenção/operação da planta, contribuem de forma

sensível no sentido de encarecer os custos. Principalmente no que se diz respeito à taxa de juros, que se empregada de forma abusiva pode encarecer demasiadamente o custo total.

Espera-se neste sentido que medidas governamentais, aliados a estudos na área do setor energético, sejam desenvolvidos para garantir produção de energia a custo baixo, tanto para a população como para setores indispensáveis ao crescimento da economia, como principalmente a indústria que depende de energia para produzir, gerar empregos e alavancar o desenvolvimento nacional.

4. CONCLUSÃO

O professor, parceiro na elaboração do conhecimento, precisa buscar metodologias motivadoras e dinâmicas, que levem o aluno a trilhar seu próprio aprendizado. A prática docente apresenta-se como uma construção e aperfeiçoamento permanente de novos caminhos para este processo. É necessário, além do domínio técnico do conteúdo programático, o investimento de questões pedagógicas que contribuam para o crescimento do aluno. O papel do professor é encontrar a forma mais adequada de integrar os vários procedimentos metodológicos gerenciando o processo de aprendizagem, coordenando e gerindo as diferenças e as convergências. A capacidade da turma em relacionar-se, a interatividade, a comunicação e expressão auxiliaram no enriquecimento e na diversificação deste trabalho; conceitos básicos da Termodinâmica e conceitos econômicos foram aplicados de forma efetiva e produtiva. As aulas adquiriram uma nuance diferente, onde aluno e professor tornaram-se cúmplices ativos no processo de aprendizagem.

Agradecimentos

Agradecemos ao Professor Marco Antônio Rosa do Nascimento, especialista em turbinas a gás e também ao Professor Sdnei de Brito Alves pela orientação na elaboração da rotina computacional.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gás Turbine World 2001/2002 Hand book. Vol. 22. South Port (USA): Pequot Publication.

MORAN, M.J., Shapiro, H.N. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** Rio de Janeiro: Ed. LTC (4ª edição), 2002.

SEN, T.K. **Fenômenos de Transporte – Apostila.** Itajubá: UNIFEI, 2000.

SILVA, F.H.F. -“Influência da umidade do ar atmosférico num sistema de potência com turbina a gás e regenerador” - **Trabalho de diploma:** EFEI, 1998.

TRANSPORT PHENOMENON TEACHING METHODOLOGY FOR THE PRODUCTION ENGINEERING STUDENTS

Abstract: *This article relates a different point of view leading to the students of Production and Mechanical Engineering of the Federal University of Itajubá, in the field of transport phenomenon, in order to put forward in practice the knowledge learned in classroom. For the development of abilities and assimilation of concepts, which are the essential aspects of production engineering; the teacher introduced themes and the classmates were divided in groups. The work in question shows the development of computation techniques linking the theory with the practice. Besides the technical aspects of Thermodynamics, some important economic aspects have also been developed. For the realization of this work, the team had the liberty to choose the programme environment as the Visual Basic, because of it's more adequate advantage of application. This paper therefore, aims to develop a programme routine by which the installation viability of a central gas turbine power plant can be analyzed and evaluated to know the total cost for the unit power produced.*

Key words: *Thermodynamics, Programation, Gas Turbine, Power, Total cost.*