

MERCOFRIO 2002 - CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM CICLO BRAYTON A GÁS NATURAL UTILIZANDO DOIS SOFTWARES COMERCIAIS

H. A. Vielmo - vielmoh@mecanica.ufrgs.br

GESTE - Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos.

Departamento de Engenharia Mecânica - UFRGS

Rua Sarmiento Leite, 425, 90050-170 - Porto Alegre, RS, Brasil.

P. S. Schneider - pss@mecanica.ufrgs.br

GESTE - Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos.

Departamento de Engenharia Mecânica - UFRGS

C. V. da Silva - crisvitor007@yahoo.com.br

GESTE - Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC - UFRGS

***Resumo.** Nos últimos anos, com o significativo aumento da crise de energia em nosso país, novas alternativas começam a aparecer para suprir a demanda energética nacional. A partir da disponibilização do gás natural da Bolívia e da Argentina, um novo mercado consumidor está surgindo rapidamente no país. Para que haja um melhor desenvolvimento deste setor e um uso mais racional desta nova fonte energética, se faz necessário um melhor entendimento dos processos que envolvem o uso deste combustível. A simulação numérica aparece neste momento como um alternativa barata e bastante eficiente para este fim. No presente estudo é simulado um sistema termodinâmico representativo de um ciclo de potência Brayton à gás natural para geração de energia elétrica. São empregados dois softwares comerciais, o IHT e o IPSEpro. São comentadas e comparadas as características de cada uma destas ferramentas.*

Palavras-chave: Gás Natural, Ciclo Brayton, Simulação Numérica, IHT, IPSEpro.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico alcançado nas últimas décadas as simulações numéricas de processos de engenharia estão se tornando cada vez mais acessíveis. O surgimento de novos softwares comerciais vem aumentando significativamente, e o que antes só era possível ser feito em grandes centros computacionais, agora, devido à disponibilidade no mercado de computadores de maior velocidade de processamento, pode ser feito em um simples PC, de forma bastante eficiente. Problemas que eram praticamente impossíveis de serem resolvidos, já estão quase que plenamente superados, e novas técnicas computacionais estão otimizando cada vez mais a resolução destes problemas.

A utilização de recursos computacionais em problemas de engenharia tem aumentado muito e a eficiência dos programas deve ser considerada na resolução destes problemas. Cada software possui suas características próprias, e as vantagens e desvantagens entre programas similares devem ser estudadas.

A situação energética do Brasil exige atenção. A partir da disponibilização do gás natural da Bolívia e da Argentina, um novo mercado consumidor está surgindo rapidamente no país. Para que haja um melhor desenvolvimento neste setor e um uso mais racional desta nova fonte energética, se faz necessário um melhor entendimento dos processos que envolvem o uso deste combustível. A simulação numérica destes processos aparece neste momento como uma alternativa bastante viável economicamente, e sua versatilidade e agilidade justificam muito bem sua aplicação. Existem vários softwares comerciais capazes de solucionar praticamente todos os tipos de problemas desta natureza, e um estudo comparativo entre estes programas é de grande importância para que se possa identificar qual programa é mais aplicável a cada grupo de problema. Neste trabalho é simulado um sistema termodinâmico representativo de um ciclo Brayton simples a gás natural. Denomina-se ciclo Brayton simples porque não se leva em conta regeneração, reaquecimento, etc. [Wylene et al., 1998]. São empregados dois softwares disponíveis comercialmente, o IHT (*Interactive Heat Transfer*) e o IPSEpro-PSE (*Interactive Process Simulation Environment*). É apresentado um estudo comparativo de eficiência e facilidade de uso entre os softwares.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

2.1. Problema Físico

Este problema consiste na simulação do funcionamento de um ciclo Brayton de potência queimando gás natural. Este ciclo de potência é composto por uma turbina, um combustor a gás natural, e um turbocompressor. Maiores detalhes sobre a instalação podem ser verificados na Fig. 1.

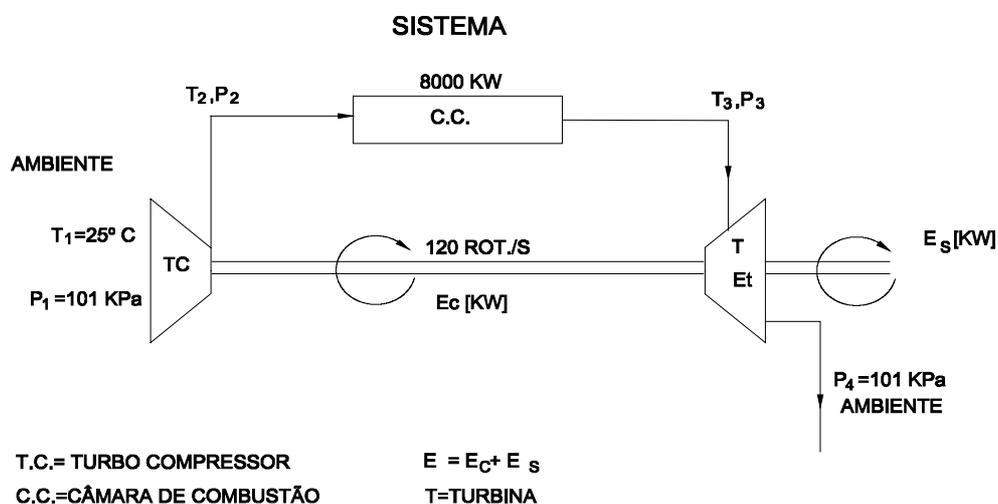


Figura 1- Sistema térmico de geração de potência a partir do gás natural

Como resultado desta simulação deseja-se obter a potência líquida de saída (E_s) da turbina, assim como o rendimento do ciclo.

Considera-se que o turbocompressor admita ar ambiente a pressão (p_1) atmosférica e temperatura (T_1) ambiente, de forma que ele possua as curvas características ilustradas na Fig. 2. Na resolução do problema estas curvas serão aproximadas através de equações.

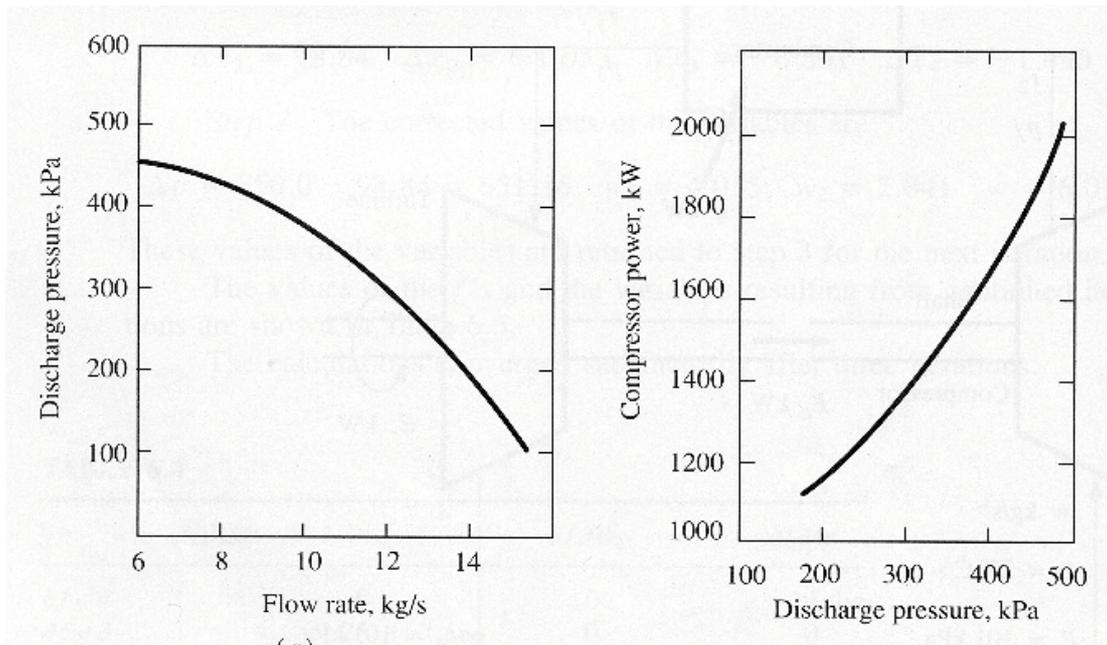


Figura 2- Curvas características do turbocompressor (Stoecker, 1989).

Assume-se que a câmara de combustão entrega uma potência térmica de 8.000 kW a partir da queima de gás natural. Para fins de cálculo, considera-se ainda que a turbina opera a 120 rps, e entrega parte de sua potência ao turbocompressor, E_c , e parte a um gerador elétrico, E_s . Da mesma forma que no turbo compressor, as curvas da turbina estão representadas pela Fig. 3, e também serão aproximadas nos cálculos através de equações.

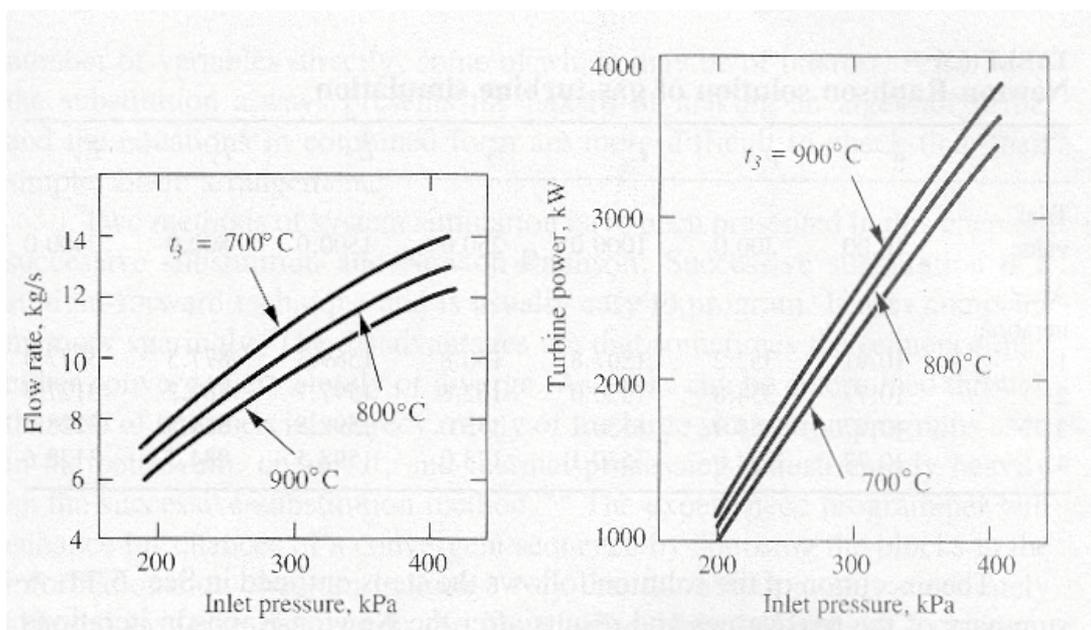


Figura 3- Curvas características da turbina (Stoecker, 1989)

Ainda como hipóteses do problema, considera-se que o ar é tomado como gás perfeito, e possui suas propriedades termodinâmicas constantes entre cada estágio do ciclo. A temperatura

(T_1) e a pressão ($p_{atm} = p_1$) de entrada do ar no turbocompressor, são de 25 C, e de 101 kPa, respectivamente. A massa de combustível (m) é desprezível frente à massa de ar, de modo que em todo ciclo tem-se $m = cte$. A perda de carga, e as perdas de calor para o meio na câmara de combustão são desprezadas, de forma que a pressão de entrada no combustor é igual a pressão de saída.

Considerou-se o gás natural como sendo formado apenas por metano, já que este gás usualmente compõe no mínimo 90% da massa da mistura. Desta forma as propriedades termofísicas usadas nos cálculos são as do CH_4 . Os valores destas propriedades foram obtidos de diferentes fontes e podem ser verificados na Tab. 1.

Tabela 1. Propriedades termofísicas usadas na solução do problema.

Propriedades	Gás Natural (CH_4)	Ar
$c_p \left[\frac{kJ}{kg.K} \right]$	-	1,03 ₁
$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	0,68 ₂	1,29 ₂

1 – Calor específico a 25°C (Van Wylen et al., 1998)

2 – Massa específica a 25°C (Schmidt et al., 1996)

2.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A formulação matemática usada para representar os componentes presentes no ciclo de potência foram obtidas na literatura (Wylen et al., 1998). As equações são as seguintes:

Conservação de massa

$$\rho_e V_e A_e = \rho_s V_s A_s, \quad (1)$$

onde ρ é a massa específica do gás, V a velocidade, A a área da seção transversal. Os subscritos “e” e “s” representam entrada e saída.

Conservação de energia

$$Q = mc_p \Delta T, \quad (2)$$

onde Q é a potência resultante da queima do gás natural, m a massa, c_p o calor específico, e ΔT a variação da temperatura.

Potência de acionamento da turbocompressor

$$Ec = 1020 - 0,383p_2 + 0,00513p_2^2, \quad (3)$$

onde p_2 é a pressão de saída, e Ec a potência de alimentação do turbocompressor.

Pressão de saída no turbocompressor

$$p_2 = 331 + 45,6m - 4,03m^2. \quad (4)$$

Descarga na turbina

$$m = 8.5019 + 0.02332p_3 + 0.48E - 4p_3^2 - 0.02644T_3 + 0.1849 \cdot 10^{-4}T_3^2 + 0.000121p_3T_3 - 0.2736 \cdot 10^{-6}p_3^2T_3 - 0.1137 \cdot 10^{-6}p_3T_3^2 + 0.2124 \cdot 10^{-9}p_3^2T_3^2 \quad (5)$$

onde T_3 e p_3 são a temperatura e pressão de saída do combustor, respectivamente.

Potência total entregue pela turbina

$$E = 1727.5 - 10.06p_3 + 0.033033p_3^2 - 7.4709T_3 + 0.003919T_3^2 + 0.050921p_3T_3 - 0.8525 \cdot 10^{-4}p_3^2T_3 - 0.2356 \cdot 10^{-4}p_3T_3^2 + 0.4473 \cdot 10^{-7}p_3^2T_3^2 \quad (6)$$

onde E é a potência total entregue pela turbina.

Distribuição da potência total na turbina

$$E = E_c + E_s \quad (7)$$

onde E_s é a potência nominal de saída que será entregue ao gerador elétrico.

2.3 Condições de contorno

Na formulação do problema foram prescritas como condições de contorno de entrada do turbocompressor a temperatura e a pressão atmosféricas. Foi também considerada constante a pressão de descarga da turbina, também em condições atmosféricas.

3. RESULTADOS

Conforme já descrito, os resultados a seguir referem-se ao uso dos softwares IHT e IPSE-pro-PSE. A Fig. 4 abaixo mostra a montagem da planta do ciclo Brayton simples alimentada a gás natural implementada no PSE. No que tange à interface, o seu padrão do tipo *CAD* a coloca em vantagem com relação ao IHT, pela facilidade de montagem da instalação. O método de montagem é bastante simples, bastando selecionar a unidade que se deseja acrescentar na planta, e arrastá-la até a posição desejada. Logo após une-se esta nova unidade às demais através de uma ligação física. Para estabelecer os parâmetros e propriedades, seleciona-se a unidade ou ligação desejada. Uma nova janela se abre fornecendo as opções para a determinação do valor destes parâmetros. Para verificar o resultado, seleciona-se a posição em que se deseja verificar, e uma janela se abre mostrando os resultados da unidade ou ligação escolhida. Também na Fig. 4 pode-se verificar esta janela com os resultados sobre a turbina, mostrando a potência total.

Na Fig. 4 as colunas situadas bem a esquerda mostram a biblioteca desenvolvida para a montagem e simulação deste sistema térmico. Nela foram agregadas as equações mostradas anteriormente, de forma a representar matematicamente cada componente.

Para a montagem do sistema no IHT foram desenvolvidos módulos de programa com as equações já descritas no modelo matemático para cada componente presente no ciclo. Estes módulos permitem, com uma simples prescrição de algumas variáveis e parâmetros, montar e calcular todos os componentes de um ciclo Brayton aberto simples. Para isso basta determinar de forma adequada cada parâmetro ou propriedades de fluido envolvido no ciclo. A Fig. 5 mostra a janela no IHT onde estão discretizadas algumas das equações destes módulos.

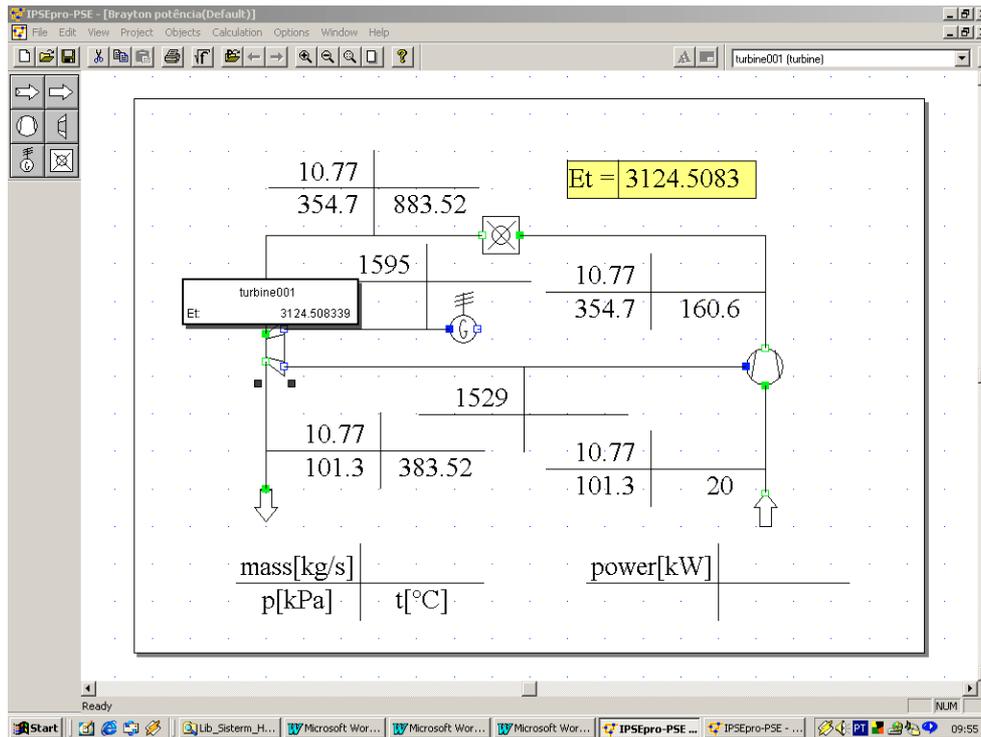


Figura 4. Visualização da planta do ciclo Brayton simples montada no IPSEpro - PSE.

Interactive Heat Transfer - C:\USUARIOS\CRISTI~1\TESE\MERCOF~1\EX3\EX31CB.MSM

File Edit Text Tools Models Solution Notepad Examples Help

Properties Correlations Rate Equations Solve Browse Explore Graph

```

/* SIMULAÇÃO DE UM CICLO BRAYTON SIMPLES A GAS NATURAL
-----
INVESTIGAÇÃO DA EFICIÊNCIA
-----*/

//Prescrições
cp=1.03 // kJ/(kgK)
T1=25 // C
p3=p2 // kPa
Q23=8000 // kW : potência entregue no queimador
//TURBOCOMPRESSOR-----
//Pressão de saída pela sua curva característica
p2=331+45.6*m-4.03*m^2 // kPa m [kg/s]
//Potência de acionamento pela sua curva característica
Ec=1020-0.383*p2+0.00513*p2^2 // kW p2[kPa]
//Pela primeira lei da Termodinâmica
// m*h1=m*h2-Ec
//m*cp*T1 = m*cp*T2-Ec
Ec=m*cp*(T2-T1)
//TURBINA-----
//Descarga
m=8.5019+0.02332*p3+0.48E-4*p3^2-0.02644*T3+0.1849E-4*T3^2+0.000121*p3*T3-0.27
0.1137E-6*p3*T3^2+0.2124E-9*p3^2*T3^2
//m [kg/s] p3[kPa] T3[C]
//Potência total entregue pela turbina
Et=1727.5-10.06*p3+0.033033*p3^2-7.4709*T3+0.003919*T3^2+0.050921*p3*T3-0.8525E
4*p3*T3^2+0.4473E-7*p3^2*T3^2 // kW
//Distribuição da potência total da turbina
Et=Ec+Es // kW: parte vai para o compressor (Ec), e parte é potência útil, de eixo (E shaft)
//CÂMARA DE COMBUSTÃO-----
//Primeira lei da Termodinâmica
//Q23+h2=h3
//Q23+m*cp*T2=m*cp*T3
Q23=m*cp*(T3-T2)
//EFICIÊNCIA
eta=Es/Q23
//=====

```

Variable	Value
Ec	1530
Es	1599
Et	3129
T2	163
T3	884.5
eta	0.1998
m	10.77
p2	354.9
p3	354.9
Q23	8000
T1	25
cp	1.03

Knowns: 3 Equation set successfully
Unknowns: 9
Working Set / Set A

Figura 5. Visualização da montagem das equações no IHT.

Na Fig. 5 pode-se também verificar, no lado direito, a janela com alguns dos resultados obtidos após a simulação deste caso.

Para melhor verificar e comparar os resultados obtidos com as simulações nos dois programas, escolheu-se alguns dos resultados mostrados na Fig. 4 (simulação no PSE) correspondentes aos resultados apresentados na janela da Fig. 5, da simulação com o IHT. Os resultados a serem analisados são aqueles obtidos para a potência total, de alimentação do turbocompressor e de alimentação do gerador elétrico. Esta situação foi escolhida pelo fato de representar o resultado efetivo do ciclo. A Tab. 2 mostra estes resultados.

Tabela 2. Resultados para as potências obtidas no ciclo com as simulações pelo IHT e PSE.

Locais no trecho considerado, Fig. (3)	PSE [kW]	IHT [kW]
Potência total.	3124	3129
Potência de alimentação do turbocompressor.	1529	1530
Potência de alimentação do gerador elétrico	1595	1599

A pequena diferença que existe entre os resultados das simulações nos dois programas é devida ao diferente critério de convergência na solução do sistema de equações (default de cada programa).

Ainda como resultado deste trabalho pode-se salientar vantagens e desvantagens com relação a utilização dos dois programas para cálculos desta natureza. Com relação ao PSE pode-se ressaltar como grande vantagem a sua facilidade na montagem de instalações devido a sua interface gráfica mais amigável. A biblioteca, uma vez desenvolvida, torna-se bastante versátil, sendo possível a montagem de praticamente qualquer tipo de configuração, bastando para isso acrescentar os equipamentos desejados. O PSE permite também, devido à uma biblioteca de unidades dimensionais existente, após a simulação converter as unidades das variáveis e parâmetros de forma bastante simples, obtendo diretamente resultados para a pressão, por exemplo, em Pa, bar, atm, mmH₂O, etc.

O PSE permite executar cálculos posteriores após a solução já estar convergida. Para isso editam-se sobre uma tabela as equações desejadas para realização de pós-processamento sobre a própria janela do PSE, sendo possível usar nos cálculos as variáveis obtidas com a simulação. Por exemplo, calcular a eficiência do ciclo. A Fig. 6 mostra o quadro verde com o resultado deste cálculo.

Como desvantagem do PSE com relação ao IHT, ele não faz varredura de uma certa variável de interesse (função “*explore*” do IHT), com a finalidade de avaliar a seqüência de soluções e poder optar pelos melhores pontos de funcionamento do sistema (otimização por varredura). A Fig. 7 mostra um gráfico obtido no IHT com a função “*explore*” sobreposta sobre a planta esquemática da instalação. Esta figura apresenta uma curva de variação do rendimento do ciclo (*eta*) com a variação da potência entregue no combustor, onde o rendimento do ciclo pode ser calculado fazendo-se uma relação entre a potência líquida obtida (*Es*) e a potência entregue na câmara de combustão (*Q*), com a queima do GN. Para o caso aqui estudado isso é de grande importância, pois se faz necessário determinar qual a quantidade ideal de combustível que deve ser queimada no combustor. Este tipo de análise pode ser estendido para qualquer equipamento separadamente, e direcionado a qualquer variável de interesse.

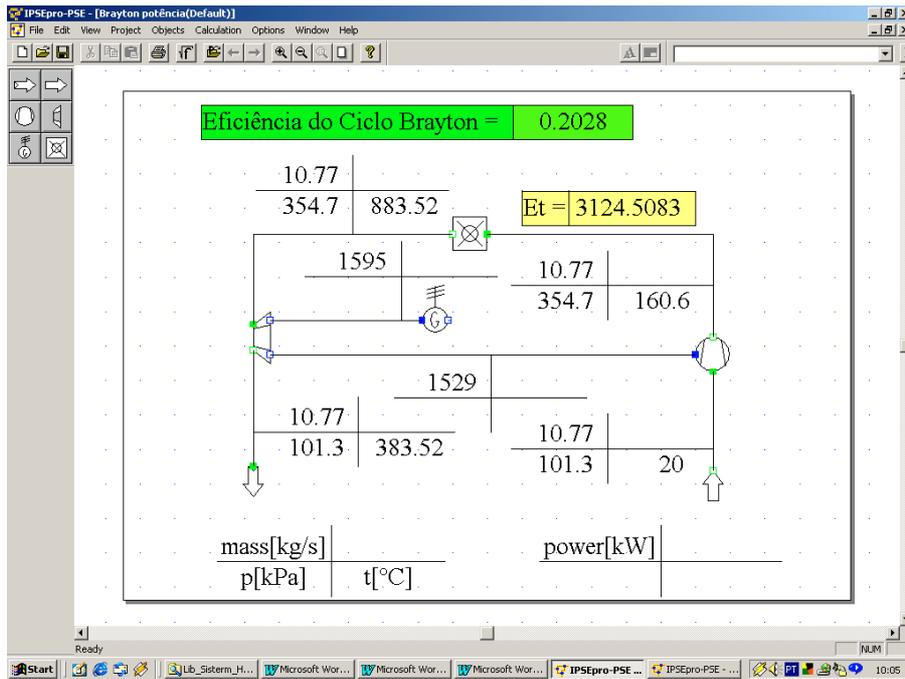


Figura 6. Cálculo de pós-processamento no PSE

Uma desvantagem significativa do IHT se apresenta no número relativamente limitado de equações que podem ser resolvidas numa certa simulação. Dependendo da complexidade do sistema, um número acima de 100 equações pode não ser possível de ser resolvido, em função de limitações na alocação de memória no computador. Sendo assim, um ciclo com um número grande de equipamentos fica prejudicado.

Os dois softwares permitem o desenvolvimento de funções externas para execução de determinados cálculos rotineiros na montagem do programa.

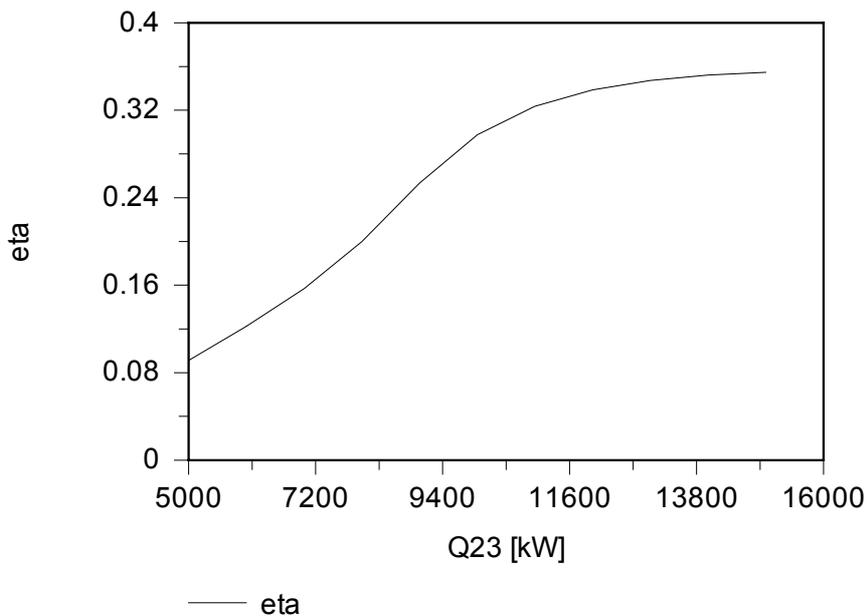


Figura 7. Utilização da função explore do IHT para determinar o rendimento do ciclo Brayton.

4. CONCLUSÕES

Como conclusão deste estudo pode-se dizer que cada software possui suas características específicas, decorrentes da sua linha conceitual de construção. As vantagens de utilização de um, ou de outro programa dependem muito do que se pretende resolver.

De um modo geral pode-se dizer que o PSE possui uma grande vantagem quanto à interface gráfica. Sua versatilidade na montagem de configurações diferentes também é bastante ampla, no âmbito do que se tem disponível na biblioteca. Este software possibilita ao usuário, de uma certa biblioteca de componentes, não envolver-se diretamente com as equações.

O PSE fornece a possibilidade de se trabalhar com um número de equações bem mais elevado que IHT. Também é capaz de realizar cálculos de pós processamento utilizando as variáveis resolvidas.

O IHT possui a vantagem de se utilizar a função gráfica “*explore*”, para verificação do melhor ponto de operação de uma certa variável. Também permite a inclusão de qualquer nova equação de interesse, desde que o usuário esteja apto a atuar sobre as equações. No PSE isso não é possível, uma vez que a biblioteca com as rotinas é fechada, não permitindo alteração.

REFERÊNCIAS

- IHT, 1996. Intellipro – John Wiley & Sons.
IPSEpro, 2000. User Documentation: Program Modules and Model Libraries, SimTech.
Schmidt, W. Frank, Henderson, Robert E., Wolgenmuth, Carl H., 1996, “Introdução às Ciências Térmicas”, Segunda Edição, Editora Edgard Blücher Ltda., Caixa Postal 5450, São Paulo, SP., Brasil.
Stoecker, W.F., 1989. “Design of Thermal Systems”, McGraw-Hill.
Wilén, Gordon J. Van, Sonntag, Richard E., Borgnakke, 1998, “Fundamentos da Termodinâmica”, Quinta Edição, Editora Edgard Blücher Ltda., Rua Pedroso Alvarenga 1245, São Paulo, SP., Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à RedeGásEnergia – Rede de Excelência do Gás Natural pelo financiamento do presente trabalho.

NUMERIC SIMULATION OF A BRAYTON CYCLE WITH NATURAL GAS USING TWO COMMERCIAL SOFTWARES

H. A. Viêlmo - vielmoh@mecanica.ufrgs.br

GESTE - Mechanical Engineering Department - UFRGS

Rua Sarmiento Leite, 425, 90050-170 - Porto Alegre, RS, Brasil.

P. S. Schneider - pss@mecanica.ufrgs.br

GESTE - Mechanical Engineering Department - UFRGS

C. V. da Silva - crisvitor007@yahoo.com.br

GESTE - Mechanical Engineering Graduation Program – PROMEC - UFRGS

***Abstract.** In the last years, with the significant increase of the energy crisis in our country, new alternatives begin to appear to supply the energy demand. Starting from the availability of the natural gas from Bolivia and Argentina, a new consuming market is being developed*

quickly at the country. For a better development in this area and a more rational use of this new energy source, it's necessary a better understanding of the processes involved in the use of this fuel. The numeric simulation appears at this time as a cheap and quite efficient alternative for this purpose. In the present study is simulated a representative thermodynamic system of a Brayton power cycle with natural gas for generation of electric energy. Two commercial softwares, IHT and IPSEpro are used. The respective characteristics of each software are commented.

Keywords: *Natural gas, Brayton cycle, Numeric simulation, IHT, IPSEpro.*