

**Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina**

**Faculdade SATC**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**Manual Básico do *software***

**EES – Engineering Equation Solver**

**Prof. Fabyo Luiz Pereira, MEng**

**Criciúma – SC, Inverno de 2013**



*Manual Básico do software EES – Engineering Equation Solver  
(Versão 1.0)*

*Este documento foi produzido usando o software LibreOffice em ambiente  
GNU/Linux Ubuntu 12.10. Seja liberto, use software livre!*

*Documento destinado à humanidade,  
pois não há evolução sem compartilhamento!*

© Copyleft. Fabyo Luiz Pereira. 2013.

É concedida permissão para copiar, distribuir e/ou modificar este documento sob os termos da GNU Free Documentation License, Versão 1.3 ou qualquer versão posterior publicada pela Free Software Foundation. Uma cópia da licença, em língua inglesa, está disponível em <http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>.





# ÍNDICE

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Instalação e Execução.....	2
1.2. Atualização.....	2
1.3. Acordo de Licença de Usuário Final.....	2
1.4. Sistema de Unidades Padrão.....	3
1.5. Menus.....	4
1.6. Janela de Equações.....	5
1.7. Exemplo.....	6
<b>2. Edição da Sintaxe.....</b>	<b>9</b>
2.1. Regras de Formatação.....	9
2.2. Inserindo Funções.....	10
2.2.1. Funções Matemáticas (“Math and String Functions”).....	10
2.2.2. Propriedades Termofísicas (“Thermophysical Properties”).....	10
2.2.3. Transferência de Calor (“Heat Transfer”).....	11
2.2.4. Projeto Mecânico (“Mechanical Design”).....	12
2.2.5. Rotinas da Biblioteca do EES (“EES Library Routines”).....	12
2.2.6. Rotinas Externas (“External Routines”).....	13
2.2.7. Constantes (“Constants”).....	13
<b>3. Informações de Conversões de Unidades (“Unit Conversion Info”).....</b>	<b>15</b>
<b>4. Tabelas Paramétricas (“Parametric Tables”).....</b>	<b>17</b>
<b>5. Janela de Diagrama (“Diagram Window”).....</b>	<b>23</b>
<b>6. Arquivo Executável (“Make Distributable Program”).....</b>	<b>29</b>
<b>7. Diagramas Termodinâmicos de Propriedades (“Property Plots”).....</b>	<b>33</b>
<b>8. Exemplos Resolvidos.....</b>	<b>35</b>
8.1. Conversão de Unidades.....	35
8.1.1. Conversões Simples.....	35
8.1.2. Conversões em Equações.....	37
8.2. Propriedades Termodinâmicas.....	37
8.2.1. Rotina Computacional.....	37
8.2.2. Executando a Rotina.....	38
8.2.3. Alerta de Unidades.....	39
8.2.4. Tabela Paramétrica.....	40
8.3. Turbina a Vapor Ideal.....	43
8.3.1. Modelagem Física e Matemática.....	43
8.3.2. Rotina Computacional.....	45
8.3.3. Executando a Rotina.....	46
8.3.4. Tabela Paramétrica.....	47

8.3.5. Interface Gráfica.....	47
8.3.6. Arquivo Executável.....	48
<b>9. Exercícios Sugeridos.....</b>	<b>51</b>
9.1. Conversões.....	51
9.2. Termodinâmica.....	52
9.3. Transferência de Calor.....	54
9.4. Geração de Vapor.....	56
9.5. Refrigeração e Condicionamento de Ar.....	58

## Prefácio

É inegável que o desenvolvimento do computador revolucionou a sociedade, uma vez que esta máquina nos trouxe à desafiadora era da informação, na qual em todas as áreas do conhecimento a produção de informação é muito maior do que nossa capacidade individual de absorvê-la. O desafio atual, então, é escolher criteriosamente o que será objeto de nossa atenção.

Neste contexto, o ensino de engenharia vem passando por um período de adaptação à esta nova realidade que se impõe, onde por um lado não se pode abrir mão de métodos tradicionais no ensino dos fundamentos técnicos, mas por outro lado as grades curriculares também devem acomodar as novas ferramentas de ensino disponíveis.

Tendo isto em mente, a principal motivação para a produção deste manual foi a necessidade cada vez mais latente, percebida pelo autor no dia a dia, de preencher uma séria deficiência acadêmica: propiciar aos estudantes um contato com *softwares* específicos de engenharia, que são verdadeiros catalisadores da relação ensino/aprendizado.

Estes *softwares* não são apenas capazes de sedimentar conhecimento, pois ao permitir a exploração da aplicação dos conhecimentos físicos e matemáticos na criação ou aperfeiçoamento de soluções, possibilitam que o estudante pratique a engenharia ainda no ambiente acadêmico, o que sempre foi um grande desafio.

Especificamente em relação ao EES, o *software* abordado neste documento, destaca-se sua capacidade de realizar análises de sensibilidade e otimizações, cujo foco deixa de ser a modelagem e passa a ser o projeto.

O público-alvo deste manual é composto por engenheiros, acadêmicos e professores dos cursos de engenharia. Para produzir este documento, foi utilizado o EES Professional v.9.359-3D (03/19/13), versão adquirida pela SATC e acessível a qualquer um de seus acadêmicos ou professores dos cursos de engenharia.

Encorajo o leitor a reportar correções, críticas e sugestões ao autor.

Bom aprendizado!

Professor Fabyo Luiz Pereira  
*fabyo.pereira@satc.edu.br*  
Criciúma, Inverno de 2013.



## 1. Introdução

Desenvolvido pela F-Chart Software ([www.fchart.com](http://www.fchart.com)), o *software* Engineering Equation Solver, (abreviadamente EES), tem como função básica resolver um conjunto de equações algébricas, incluindo equações não-lineares, equações diferenciais e equações com variáveis complexas.

O programa também é capaz de fazer otimizações, obter regressões lineares e não-lineares, gerar gráficos de alta qualidade para publicações, simplificar análises de incertezas e fazer animações.

O EES foi desenvolvido para rodar em qualquer uma das versões do sistema operacional Windows, tanto 32 quanto 64 bits, e pode ser utilizado nos sistemas operacionais Linux e Macintosh através de programas emuladores.

Existem duas principais diferenças entre o EES e os demais programas de resolução de equações numéricas:

- O EES identifica e agrupa automaticamente as equações que devem ser resolvidas simultaneamente, o que simplifica o processo para o usuário e assegura que o *solver* sempre operará com máxima eficiência.
- O EES contém uma biblioteca embutida com várias funções matemáticas e propriedades termofísicas para centenas de substâncias, extremamente úteis para cálculos de engenharia. Como exemplo, pode-se obter qualquer propriedade termodinâmica de uma substância através do uso de funções em termos de duas outras propriedades. Além disso, se necessário, o usuário pode adicionar relações funcionais.

O uso do EES se mostra muito útil, por exemplo, para as disciplinas de engenharia da área térmica, nas quais deve-se resolver problemas que exigem consultas de tabelas de propriedades e domínio de técnicas de solução de equações. Entretanto, uma vez que o estudante esteja familiarizado com essas dificuldades, não há sentido em continuar usando tempo para consultar tabelas e resolver equações, pois esse tempo poderia ser utilizado para o estudo e compreensão de particularidades dos problemas. Dessa forma, o EES permite que o usuário se concentre mais no projeto, libertando-o das tarefas mundanas básicas.

O objetivo deste documento é o de apresentar algumas funcionalidades básicas do EES Professional, para tornar o usuário apto a resolver um amplo leque de problemas de engenharia, com diferentes graus de complexidade.

Foram incluídos alguns exemplos, resolvidos passo a passo, com dois objetivos: familiarizar o usuário com o *software* e servir como ponto de partida para a resolução de outros problemas.

### 1.1. Instalação e Execução

Para instalar o EES, o usuário deve baixar, via Moodle da SATC, os arquivos `setup_ees.exe` e `EES.dft`. O primeiro é o executável que instala o programa, enquanto o segundo é a licença.

Para instalar, após baixar os arquivos dê um duplo clique no arquivo `setup_ees.exe` e siga as instruções de instalação. Após a instalação, copie o arquivo `EES.dft` para a pasta onde está instalado o programa, que está localizada em `C:\EES32`. Após estes passos, o programa se encontra pronto para utilização.

Para executar o programa, clique duas vezes com o botão esquerdo do mouse no arquivo `EES.exe`. Como sugestão, crie um atalho na área de trabalho para o arquivo `EES.exe`.

### 1.2. Atualização

O desenvolvedor atualiza o EES uma vez por ano, em julho. Para manter o software funcionando e evitar o cancelamento da licença, o usuário deve instalar a atualização antes do dia 1º de setembro.

### 1.3. Acordo de Licença de Usuário Final

A SATC adquiriu uma licença acadêmica do EES Professional. O acordo de licença de usuário final do EES, em inglês, disponível em <http://www.fchart.com/ees/eula.php>, estabelece que esta licença pode ser utilizada por qualquer acadêmico ou professor dos cursos de engenharia da SATC, exclusivamente para fins educacionais ou de treinamento necessários para a colação de grau.

Esta licença veta seu uso comercial, de negócios ou em fins não educacionais. Também é vetada a utilização do EES por parte de terceiros que não possuam vínculo formal com os cursos de engenharia da SATC. A não observância destas regras implica no cancelamento, por parte do desenvolvedor do *software*, da licença adquirida pela SATC, bem como a aplicação de sanções legais ao infrator.

Portanto, em hipótese alguma disponibilize a terceiros ou em páginas virtuais de compartilhamento qualquer um dos arquivos baixados via Moodle.

#### 1.4. Sistema de Unidades Padrão

Ao executar o programa pela primeira vez, aparece a caixa de diálogo mostrada na Figura 1, que mostra as informações de registro e a versão do programa (necessárias caso o usuário necessite de suporte técnico). Há duas opções: clicar em “Preferences” ou em “Continue”. Para fechar a caixa de diálogo e começar um novo projeto, clique em “Continue”.

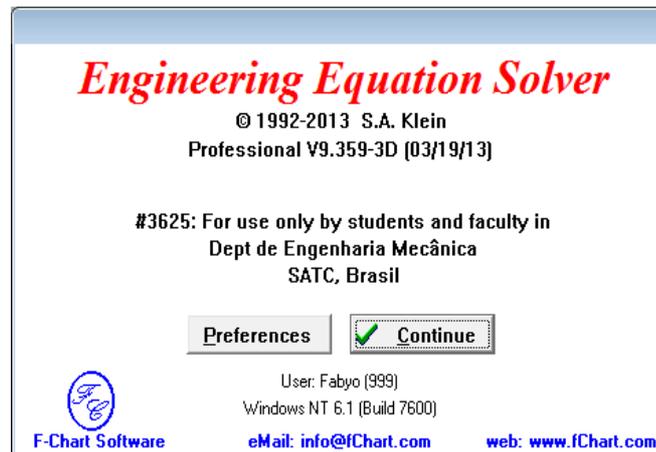


Figura 1: Caixa de diálogo ao iniciar o programa pela primeira vez.

Caso clique em “Preferences”, abrirá a janela mostrada na Figura 2, que permite verificar ou redefinir o sistema de unidades padrão. O usuário pode alterar as unidades como quiser, e para salvar o novo sistema de unidades padrão deve clicar em “Store” e sobrescrever o arquivo EES.PRF. O sistema de unidades também pode ser alterado clicando em “Options” e depois em “Unit System”. De acordo com a Figura 2, por padrão o EES está configurado no sistema internacional (SI) de unidades, com as propriedades específicas em base mássica, temperatura em °C, pressão em kPa, energia em kJ e funções trigonométricas em graus.

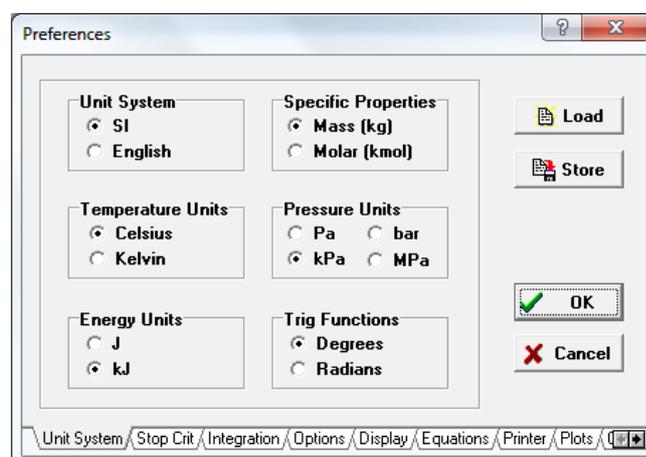


Figura 2: Definição do sistema de unidades padrão.

## 1.5. Menus

Após definir o sistema de unidades padrão, aparece a interface inicial do programa, mostrada na Figura 3. Observe que a janela de equações (“Equations Window”), descrita na seção 1.6, aparece por padrão ao executar o programa.

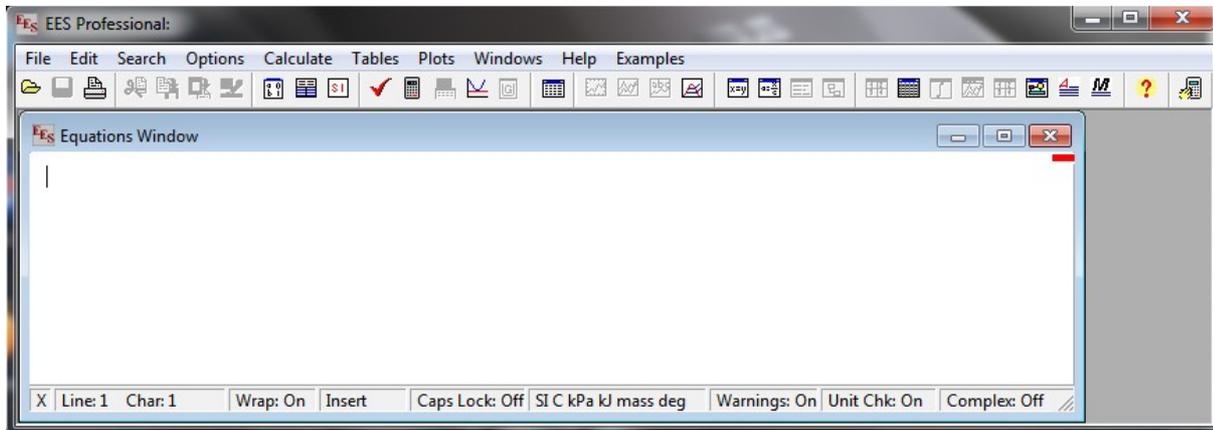


Figura 3: Interface inicial do programa.

Observa-se a presença da barra de menus com as seguintes opções:

- “File” → Comandos para carregar, mesclar, salvar e imprimir.
- “Edit” → Comandos de edição para copiar, cortar e colar.
- “Search” → Comandos de procura e substituição.
- “Options” → Comandos para estimar valores e limites de variáveis; sistema de unidades; informações; preferências e acesso à biblioteca de funções.
- “Calculate” → Comandos de checagem, formatação e resolução de equações.
- “Tables” → Comandos para definir e alterar tabelas de pesquisa e paramétricas.
- “Plot” → Comandos para criar ou modificar um gráfico.
- “Windows” → Comandos para alternar e organizar as janelas.
- “Help” → Comandos para acessar o manual do programa ou ajuda.

A barra de ferramentas se encontra logo abaixo da barra de menus e permite acessar de maneira rápida alguns dos comandos mais frequentemente utilizados da barra de menus. A Tabela 1.1 mostra e descreve alguns dos principais comandos que constam na barra de ferramentas, além de indicar os respectivos ícones e atalhos de teclado que podem ser utilizados para acessá-los.

Tabela 1.1: Principais comandos da barra de ferramentas.

Ícone	Nome (Atalho)	Descrição
	Variable Info (F9)	Mostra as variáveis que aparecem na sintaxe da rotina computacional, e permite atribuir ou alterar suas unidades.
	Function Info (Ctrl+Alt+F)	Permite adicionar funções matemáticas e termofísicas.
	Unit System (Ctrl+Alt+U)	Permite alterar o sistema de unidades padrão.
	Check Equations (Ctrl+K)	Permite verificar se o número de equações e de incógnitas é igual, e também verificar se há erros na sintaxe.
	Solve (F2)	Resolve as equações.
	Solve Table (F3)	Resolve as equações paramétricas.
	New Parametric Table	Permite criar tabelas paramétricas para realizar estudos de sensibilidade.
	New Plot Window	Permite obter um gráfico relacionando duas variáveis quaisquer de uma tabela paramétrica.
	Overlay Plot	Permite adicionar curvas a um gráfico já obtido.
	Property Plot	Permite obter gráficos de propriedades termodinâmicas das substâncias que constam na biblioteca do EES.
	Equations Window (Ctrl+E)	Janela principal do programa, pois é onde deve ser escrita a sintaxe da rotina computacional.
	Formatted Equations (F10)	Janela que mostra a sintaxe da rotina computacional na forma de notação matemática, ideal para impressão.
	Solution Window (Ctrl+U)	Janela que mostra os valores de todas as variáveis obtidas depois da resolução do conjunto de equações.
	Parametric Table (Ctrl+n°)	Mostra as tabelas paramétricas já criadas.
	Plot Window (Ctrl+Alt+n°)	Mostra os gráficos já criados.
	Diagram Window (Ctrl+D)	Permite desenvolver uma interface gráfica para o problema que a sintaxe da rotina computacional resolve.

## 1.6. Janela de Equações

Como se pode observar na Figura 3, a janela “Equations Window” está em primeiro plano. É nesta janela que deve ser escrita e editada a sintaxe da rotina computacional. Observa-se, na Figura 4, que esta janela contém uma barra de status que informa sobre a posição do cursor no corpo da rotina computacional, se a tecla Caps Lock está ativada, dados sobre o sistema de unidades definido, entre outros.

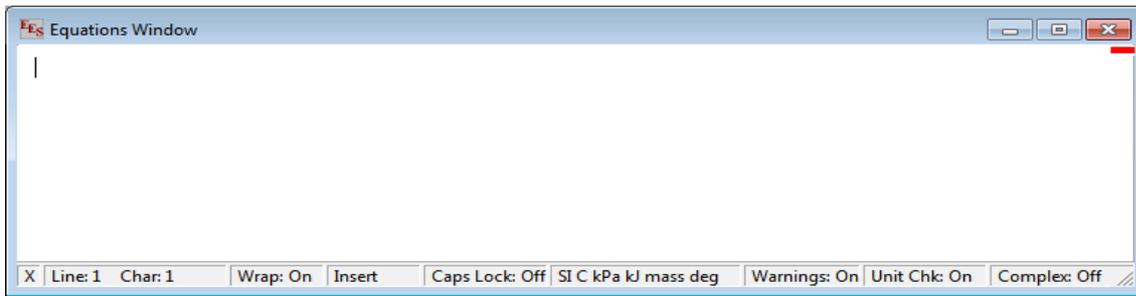


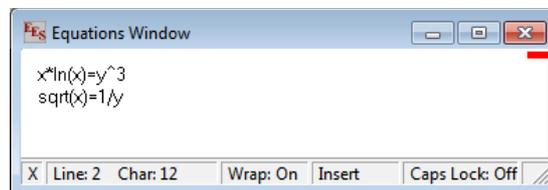
Figura 4: Janela de edição da rotina computacional.

## 1.7. Exemplo

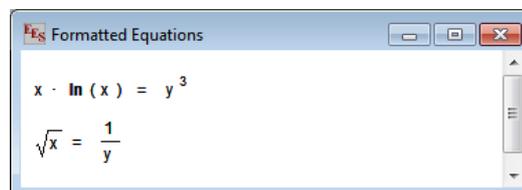
Para mostrar a capacidade do programa, será resolvido o seguinte sistema de equações não lineares:

$$\begin{cases} x \cdot \ln x = y^3 \\ \sqrt{x} = \frac{1}{y} \end{cases} \quad (1.1)$$

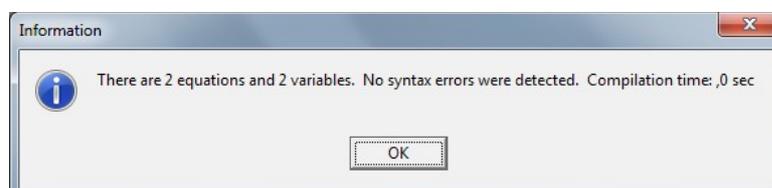
Execute o EES, e na janela “Equations Window” digite o sistema de equações não lineares dado na equação 1.1, que ficará da forma mostrada na figura abaixo.



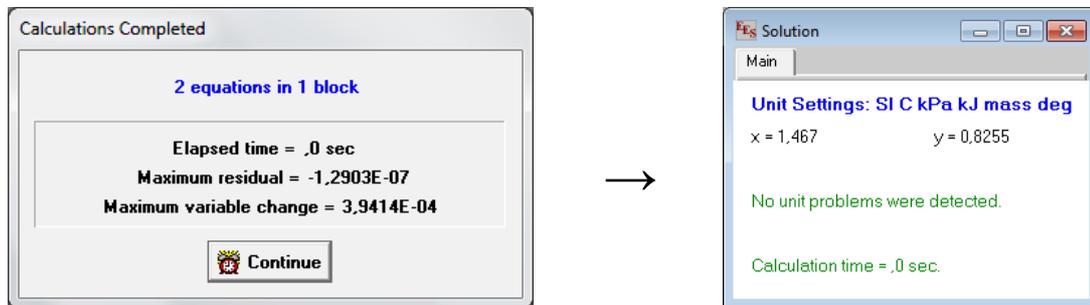
Caso queira visualizar as equações em notação matemática, na barra de ferramentas selecione “Formatted Equations”, ou use o atalho F10.



Para checar as equações, selecione o comando “Check Equations” na barra de ferramentas, ou use o atalho Ctrl+K, e será mostrada a janela abaixo, indicando que há duas equações e duas incógnitas e que não há erros de sintaxe.



Para resolver o sistema de equações, selecione o comando “Solve” na barra de ferramentas, ou use o atalho F2, e será mostrada a figura abaixo à esquerda, indicando que a resolução foi completada. Clique no botão “Continue” e então a solução é mostrada na figura abaixo à direita.



Uma observação importante é que o EES não é *case sensitive*, ou seja, não importa se as variáveis são digitadas em letras maiúsculas ou minúsculas. Dessa forma, caso fosse digitado o sistema de equações não lineares abaixo, a resposta seria a mesma obtida acima.

$$\begin{cases} X \cdot \ln x = y^3 \\ \sqrt{x} = \frac{1}{Y} \end{cases} \quad (1.2)$$



## 2. Edição da Sintaxe

### 2.1. Regras de Formatação

Como visto, as equações devem ser inseridas na janela “Equations Window”, e devem obedecer as seguintes regras de formatação:

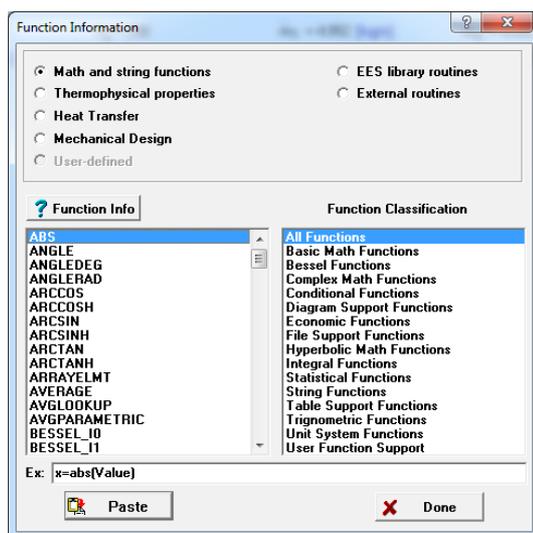
- Letras maiúsculas ou minúsculas são consideradas como iguais.
- Linhas em branco e espaços podem ser inseridos à vontade, pois são ignorados.
- Comentários devem ser inserido entre chaves { } ou entre aspas duplas “ ”. Os comentários podem ocupar quantas linhas se desejar. Na janela “Formatted Equations”, comentários entre chaves são ocultados, enquanto comentários entre aspas duplas são mostrados.
- Os nomes das variáveis devem começar com uma letra e podem conter qualquer caractere do teclado, exceto os seguintes: ( ) ' | \* / + - ^ { } : “ ;. O tamanho máximo de um nome de variável é de 30 caracteres.
- Múltiplas equações podem ser digitadas na mesma linha, desde que sejam separadas por dois pontos. Uma linha pode conter no máximo 255 caracteres.
- Para elevar uma variável ou constante a uma potência, pode-se usar ^ ou \*\*. Exemplo:  $y=x^2$  ou  $y=x^{**2}$ .
- A ordem na qual as equações são inseridas não importa.
- A posição das variáveis conhecidas e incógnitas nas equações não importa.
- As unidades de constantes podem ser inseridas entre colchetes logo depois da inserção da constante. Exemplo:  $g = 9,81 [m/s^2]$ .
- Pode-se adicionar caracteres subscritos ou sobrescritos nas variáveis, respectivamente usando os símbolos \_ ou |. Exemplo:  $m_1$  e  $m^1$ , respectivamente aparecem na janela “Formatted Equations” como  $m_1$  e  $m^1$ .
- Nomes de símbolos gregos são substituídos, na janela “Formatted Equations”, pelos caracteres gregos. Exemplo: eta resulta em  $\eta$ .
- Para inserir variáveis de fluxo deve-se utilizar a sintaxe \_dot. Exemplo:  $m_{dot_1}$  aparece na janela “Formatted Equations” como  $\dot{m}_1$ .

## 2.2. Inserindo Funções

O usuário pode inserir diversas funções que constam na biblioteca do EES, acessando, no menu “Option”, o comando “Function Info”, que também pode ser acessado usando o atalho Ctrl+Alt+F, e que leva o usuário à janela mostrada abaixo. Abaixo são listadas as classes de funções disponíveis.

### 2.2.1. Funções Matemáticas (“Math and String Functions”)

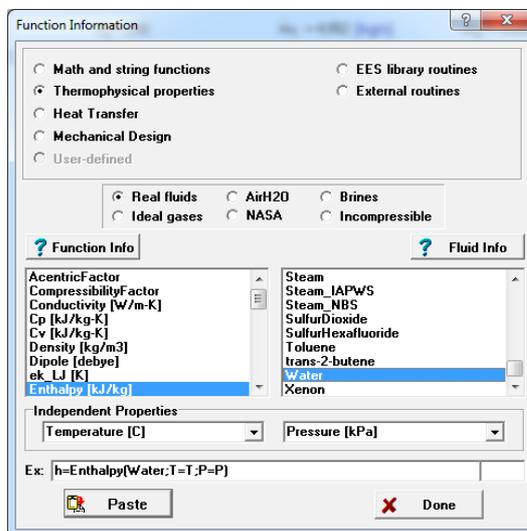
Esta biblioteca permite que o usuário adicione à sua rotina computacional uma grande variedade de funções matemáticas. Quando ativa, abaixo à esquerda aparece a lista de funções e à direita aparece a lista de classes de funções matemáticas, como mostrado na figura abaixo. Após selecionada a função, a sintaxe pode ser vista no campo “Ex:”, e caso seja a função desejada pelo usuário, basta clicar em “Paste” e a sintaxe da função será inserida na rotina computacional. Observe que no caso da função selecionada, ABS, que retorna o valor absoluto de um número, “Value” deve ser substituído por um valor numérico ou função.



### 2.2.2. Propriedades Termofísicas (“Thermophysical Properties”)

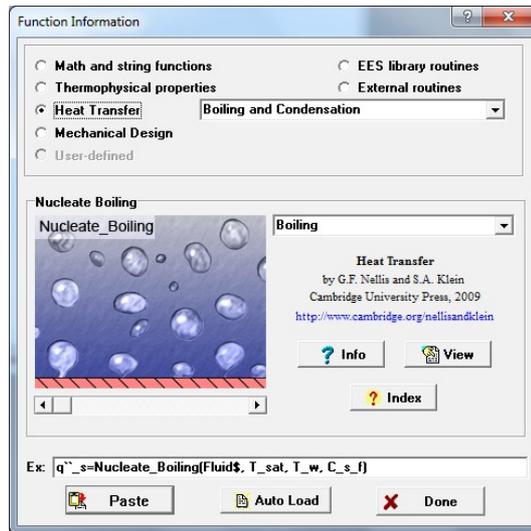
Esta biblioteca permite que o usuário adicione propriedades termofísicas de uma grande quantidade de substâncias à sua rotina computacional. Quando ativa, abaixo à esquerda aparece a lista de propriedades termofísicas e à direita aparece a lista de substâncias. A figura abaixo mostra o exemplo de inserção da entalpia da água na rotina computacional. Observe que abaixo das janelas de seleção há duas listas de propriedades independentes, às quais o usuário pode escolher livremente, obtendo no campo “Ex:” a sintaxe da propriedade.

Neste exemplo, a entalpia da água é inserida em função da temperatura e da pressão. Observe que se for inserido um par temperatura/pressão de saturação, ocorrerá um erro ao resolver, pois na região de saturação a pressão e a temperatura não são propriedades independentes. Portanto, nesta região o par de propriedades escolhidas não pode ser temperatura/pressão.



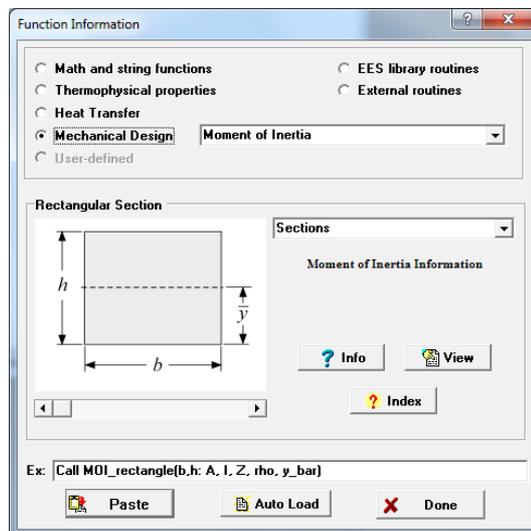
### 2.2.3. Transferência de Calor (“Heat Transfer”)

Esta biblioteca permite que o usuário adicione uma ampla classe de problemas fundamentais de transferência de calor à sua rotina computacional, como mostrado na figura abaixo. Quando ativa, logo à direita de “Heat Transfer” aparece um campo com uma lista de seleção da classe de problema (no caso está selecionado a classe “Boiling and Condensation”, ou seja, Ebulição e Condensação). Abaixo à direita aparece um campo de lista de seleção que possibilita escolher, dentro da classe escolhida, o tipo de problema (no caso está selecionado “Boiling”, ou seja, Ebulição). Abaixo à esquerda aparece uma representação do problema selecionado, e abaixo da figura aparece uma barra que permite selecionar diferentes modelagens do tipo de problema escolhido (no caso está selecionado “Nucleate Boiling”, ou seja, Ebulição Nucleada).



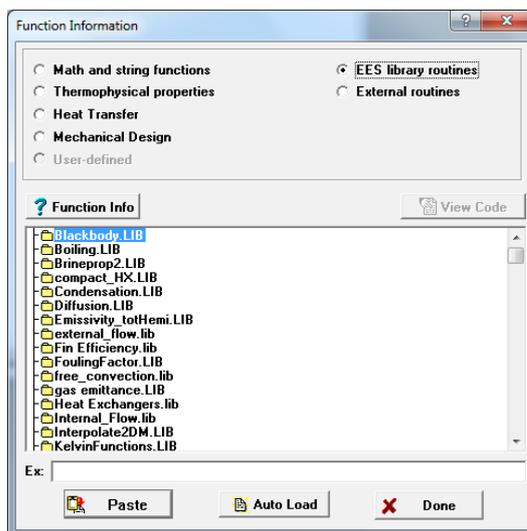
#### 2.2.4. Projeto Mecânico (“Mechanical Design”)

Esta biblioteca permite que o usuário adicione modelagens de momento de inércia e de concentração de tensões à sua rotina computacional, como mostrado na figura abaixo. A seleção segue o mesmo princípio descrito na seção anterior.



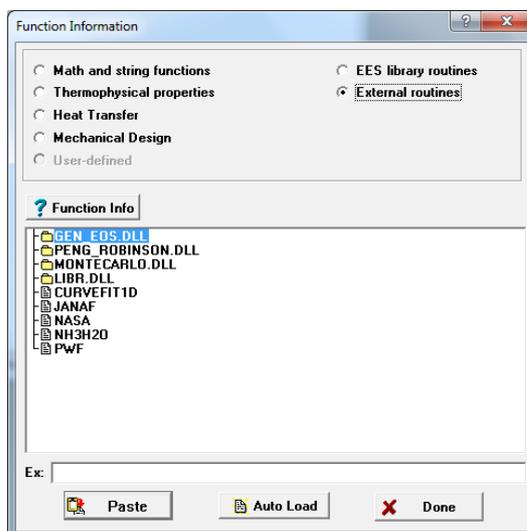
#### 2.2.5. Rotinas da Biblioteca do EES (“EES Library Routines”)

Esta biblioteca permite que o usuário adicione rotinas computacionais presentes na biblioteca do EES, para uma ampla classe de problemas matemáticos de engenharia, à sua rotina computacional, como mostrado na figura abaixo. Também é possível visualizar o código da rotina clicando em “View Code”.



### 2.2.6. Rotinas Externas (“External Routines”)

Esta biblioteca permite que o usuário adicione rotinas computacionais externas à sua rotina computacional, como mostrado na figura abaixo. Também é possível visualizar o código da rotina clicando em “View Code”.



### 2.2.7. Constantes (“Constants”)

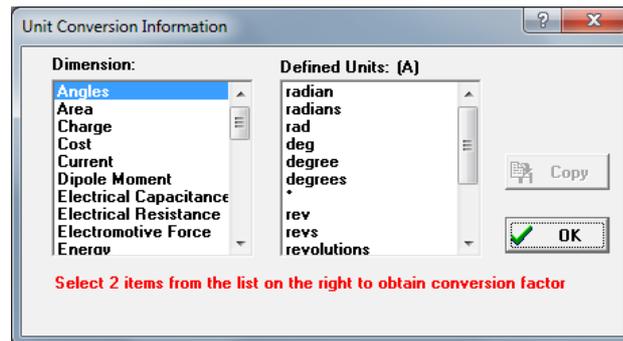
Pode-se inserir constantes na rotina computacional, clicando em “Options”, “Constants”, como mostrado na figura abaixo. Observe que é possível personalizar esta biblioteca através da adição de constantes, clicando em “Add”.

Name	Description	Value	Units
h#	Planck's constant	6,626E-37	kJ-s
Mp#	Proton rest mass	1,673E-27	kg
h_C3H6_g#	Propylene (gas) enthalpy of formation (25C, 77F)	-20410	kJ/kmol
R#	Gas constant	8,314	kJ/kmol-K
Blue#	the color blue	1,671E+07	
Vo#	Volume of ideal gas, standard conditions	22,41	m <sup>3</sup> /kmol
T_zero#	T_zero# + C (or F) = K (or R)	273,2	K
h_C8H18_g#	n-Octane (gas) enthalpy of formation (25C, 77F)	-208450	kJ/kmol
h_CH3OH_l#	Methanol (liq) enthalpy of formation (25C, 77F)	-238660	kJ/kmol
R_inf#	Rydberg constant	1,097E+07	1/m
Po#	Normal atmospheric pressure	101,3	kPa

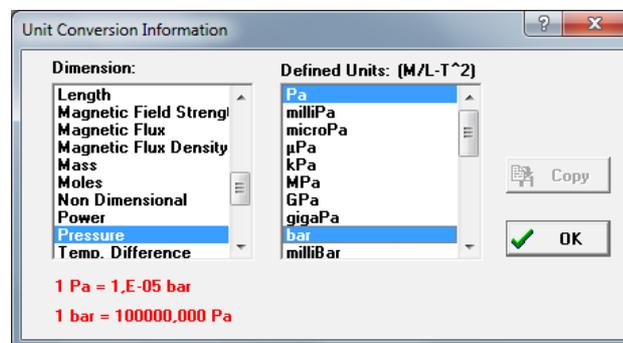
 Paste
  Add →
 Done

### 3. Informações de Conversões de Unidades (“Unit Conversion Info”)

O EES possibilita consultar uma lista de informações de unidades e conversões de uma grande variedade de grandezas físicas, clicando em “Options”, e depois em “Unit Conversion Info”. Aparecerá a janela mostrada na figura abaixo. Na lista de seleção à esquerda, seleciona-se a grandeza, enquanto na lista de seleção à direita são mostradas as unidades disponíveis para a grandeza selecionada.



Para consultar uma constante de conversão entre duas unidades, deve-se selecionar as duas unidades na lista de seleção à direita, conforme exemplo da figura abaixo, onde para a pressão, considerando as unidades Pa e bar, obtém-se como constantes de conversão: 1 Pa = 0,00001 bar e 1 bar = 100.000 Pa.



Observe que na figura acima, no cabeçalho da lista de seleção à direita, em “Defined Units” aparece a unidade fundamental da grandeza selecionada. A unidade fundamental para a pressão é  $M/L \cdot T^2$ , resultado da razão da massa  $M$  pelo produto entre o comprimento  $L$  e o tempo ao quadrado  $T^2$ . Esta unidade fundamental pode ser facilmente demonstrada através de uma análise dimensional, lembrando que  $kg$ ,  $m$  e  $s$  são, respectivamente, as unidades no sistema MKS para as grandezas fundamentais massa ( $M$ ), comprimento ( $L$ ) e tempo ( $T$ ):

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot a}{A} = \left[ \frac{kg \cdot \frac{m}{s^2}}{m^2} \right] = \left[ \frac{kg}{m \cdot s^2} \right] = \left[ \frac{M}{L \cdot T^2} \right]$$

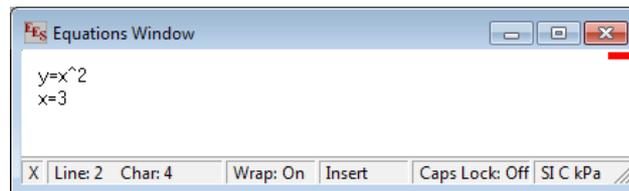


#### 4. Tabelas Paramétricas (“Parametric Tables”)

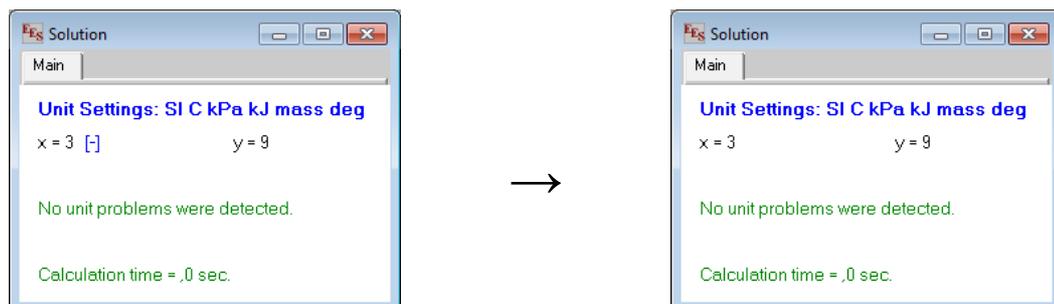
As tabelas paramétricas são bastantes úteis para, por exemplo, obter tabelas termodinâmicas para um determinado fluido ou realizar análises de sensibilidade de processos ou ciclos termodinâmicos. Pode-se criar uma tabela paramétrica clicando em “Tables”, e depois em “New Parametric Table”, ou clicando no ícone da barra de ferramentas descrito na Tabela 1.1.

Como exemplo, será implementada uma tabela paramétrica simples, capaz de calcular valores de uma função qualquer, digamos  $y=x^2$ , sendo conhecidos alguns valores de  $x$ .

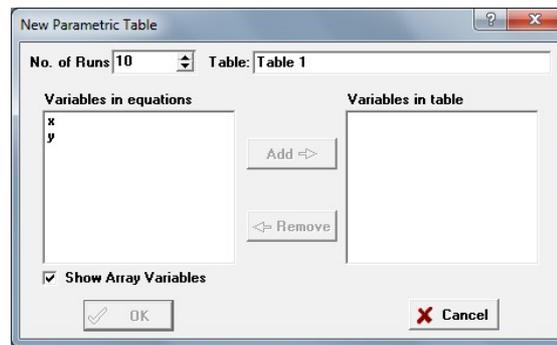
Primeiramente, na janela de equações (“Equations Window”), escreva a rotina computacional (a equação), e também atribua um valor qualquer para a variável  $x$ , tal como mostrado na figura abaixo.



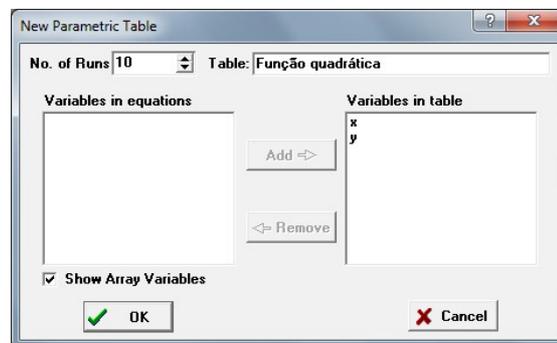
Execute a rotina pressionando F2, e se obtém a janela de soluções mostrada na figura abaixo à esquerda. Embora não tenha havido alerta de problema com unidades, elimine a unidade [-] da variável  $x$ , clicando com o botão direito sobre ela. A janela de soluções ficará como mostrado na figura abaixo à direita.



Agora, para adicionar uma tabela paramétrica, clique em “Tables”, e depois em “New Parametric Table”. Aparecerá a janela mostrada abaixo, onde se deve selecionar as variáveis que farão parte da tabela. Observe que se pode escolher o número de linhas da tabela no campo “No. of Runs”, e também atribuir um nome para a tabela no campo “Table:”.



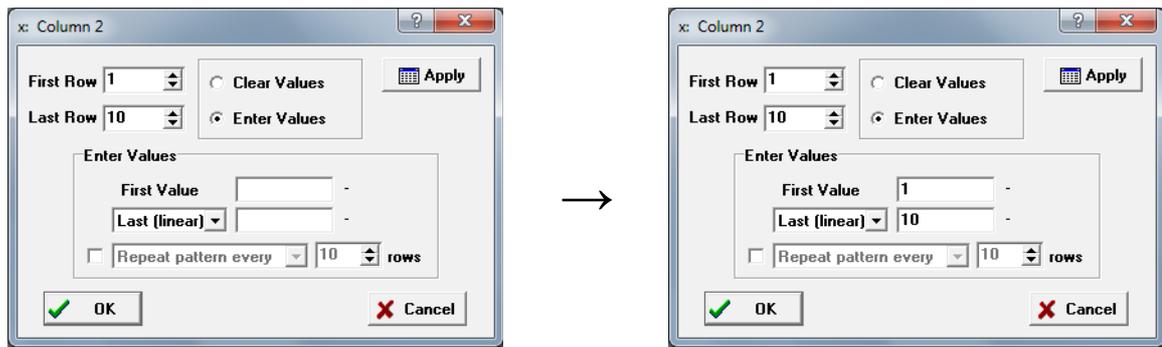
Como se deseja que a tabela retorne valores de  $y$  sendo conhecidos os valores de  $x$ , selecione as duas variáveis na janela “Variables in equations”. Clique em “Add” e observe que as variáveis selecionadas são deslocadas para a janela “Variables in table”. Nomeie a tabela como “Função quadrática”, e se desejar altere o número de linhas. A janela ficará como a mostrada abaixo.



Clique em “OK”. Aparecerá a tabela mostrada abaixo.

	1	2
	x	y
Run 1		
Run 2		
Run 3		
Run 4		
Run 5		
Run 6		
Run 7		
Run 8		
Run 9		
Run 10		

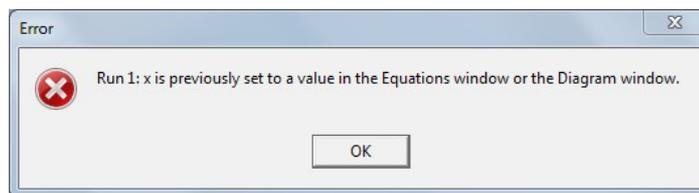
Agora é necessário escolher uma das variáveis da tabela como variável de entrada, ou seja, aquela à qual serão atribuídos valores para que a outra seja calculada. Escolhendo  $x$  como variável de entrada, vamos atribuir a ela valores de 1 a 10. Clique em “Alter values”, que é a seta de cor preta no canto superior direito da coluna da variável  $x$ . Aparecerá a janela mostrada na figura abaixo à esquerda. Em “First Value”, digite 1, e em “Last (linear)” digite 10. A janela ficará como a mostrada abaixo à direita.



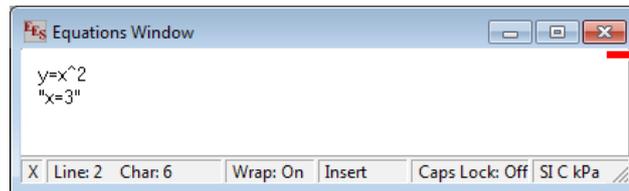
Clique em “Apply” e verifique na tabela os valores atribuídos à variável x. Clique em “OK”. A tabela paramétrica ficará como mostrado na figura abaixo.

	1	2
	x	y
Run 1	1	
Run 2	2	
Run 3	3	
Run 4	4	
Run 5	5	
Run 6	6	
Run 7	7	
Run 8	8	
Run 9	9	
Run 10	10	

Agora se deve resolver a tabela paramétrica, para que a mesma calcule as demais colunas. Para isso, clique na seta verde mostrada na figura acima. Também se pode resolver uma tabela paramétrica clicando em “Calculate” e depois em “Solve Table”, ou utilizando a tecla de atalho F3, porém no caso de haver mais de uma tabela deve-se selecionar qual ou quais tabelas devem ser resolvidas. Aparecerá uma janela indicando que ocorreu um erro, mostrada abaixo.



Isto ocorre porque na janela de equações (“Equations Window”), atribuiu-se um valor numérico fixo à variável x ( $x=3$ ), enquanto na tabela paramétrica atribuíram-se diferentes valores a esta variável. Assim, ocorre um erro porque existe um conflito de atribuições de valores à x. Para resolver isto, basta comentar o valor da variável x na janela de equações, colocando-a entre aspas duplas, da maneira mostrada na figura abaixo (excluir o valor da variável x possui o mesmo efeito).



Executando novamente a tabela paramétrica, não ocorre mais o erro e a mesma retorna os resultados mostrados na figura abaixo.

The screenshot shows the 'Parametric Table' window. The title is 'Função quadrática'. The table has columns for 'x' and 'y'. The results are as follows:

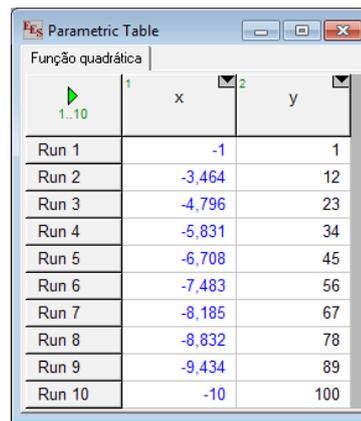
	x	y
Run 1	1	1
Run 2	2	4
Run 3	3	9
Run 4	4	16
Run 5	5	25
Run 6	6	36
Run 7	7	49
Run 8	8	64
Run 9	9	81
Run 10	10	100

Pode-se também atribuir valores à variável y e calcular os valores de x. Para isto, na coluna da variável x, clique em “Alter values”, depois em “Clear values”, em “Apply” e finalmente em “OK”. A tabela ficará em branco. Agora atribua valores para a variável y, por exemplo de 1 a 100, da forma já feita anteriormente. A tabela ficará como mostrado abaixo.

The screenshot shows the 'Parametric Table' window. The title is 'Função quadrática'. The table has columns for 'x' and 'y'. The results are as follows:

	x	y
Run 1		1
Run 2		12
Run 3		23
Run 4		34
Run 5		45
Run 6		56
Run 7		67
Run 8		78
Run 9		89
Run 10		100

Executando a tabela paramétrica, obtém-se a tabela abaixo com os valores de x calculados. Observe que o EES retorna valores negativos, já que como  $y=x^2$ , então  $x=y^{1/2}$ , e assim, por exemplo, como 100 ou -10 elevados ao quadrado resultam em 100, então a raiz de 100 pode ser 10 ou -10. Esta funcionalidade de se pode atribuir valores a diferentes variáveis nas tabelas paramétricas, sem precisar alterar a rotina computacional, é bastante útil em diversas classes de problemas em engenharia.



The screenshot shows a window titled "EES Parametric Table" with a subtitle "Função quadrática". The window contains a table with three columns: a column for the iteration number (1..10), a column labeled "x", and a column labeled "y". The table contains 10 rows of data, labeled "Run 1" through "Run 10". The values in the "x" column range from -1 to -10, and the values in the "y" column range from 1 to 100. The table is as follows:

1..10	x	y
Run 1	-1	1
Run 2	-3,464	12
Run 3	-4,796	23
Run 4	-5,831	34
Run 5	-6,708	45
Run 6	-7,483	56
Run 7	-8,185	67
Run 8	-8,832	78
Run 9	-9,434	89
Run 10	-10	100

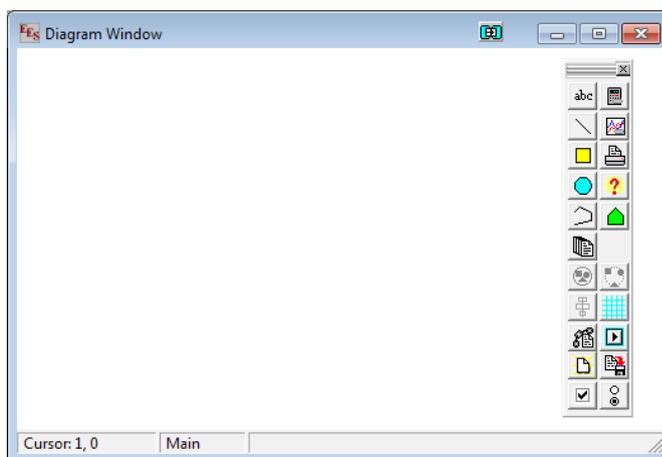
Clique em “File”, e depois em “Save As...”, e salve o exemplo com o nome “Função quadrática”. Observe que o programa adiciona a extensão .EES automaticamente ao arquivo.



## 5. Janela de Diagrama (“Diagram Window”)

A janela de diagrama (“Diagram Window”) possibilita incorporar uma interface gráfica ao problema que a rotina computacional resolve, de modo a permitir dinamismo ao usuário, quando este deseja alterar os dados de entrada e identificar como os dados de saída são afetados.

Pode-se acessar a janela de diagrama clicando em “Windows”, e depois em “Diagram Window”, ou clicando no ícone respectivo na barra de ferramentas (veja Tabela 1.1), ou usando o atalho Ctrl+D. Aparecerá a janela mostrada na figura abaixo.



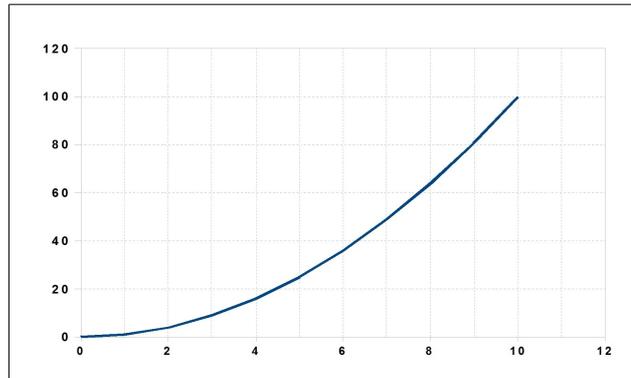
Observa-se a existência de uma barra de ferramentas de edição à direita da janela. Esta barra é ativada sempre que se acessa a “Diagram Window”, e pode ser fechada clicando no botão fechar no canto superior direito. Quando esta barra estiver fechada, o usuário poderá usar a “Diagram Window” como se fosse um programa matemático, ou seja, para resolver problemas. Para acionar a barra de ferramentas novamente, aja como se a “Diagram Window” estivesse fechada, ou seja, use o atalho Ctrl+D.

A barra de ferramentas de edição possui diversas funcionalidades que podem ser adicionadas à interface gráfica (as quais o usuário deve ser encorajado a explorar):

- Texto, texto formatado, variável de entrada ou variável de saída.
- Botões de execução, de barras de animação, de gráficos já obtidos no EES, de ajuda, de impressão, de carregamento (load) e de salvamento (save).
- Figuras geométricas diversas (linhas, retângulos, circunferências, elipses, polígonos).
- Figuras da paleta de ilustrações do EES.
- Grade de plano de fundo.
- Botões de links (para abrir outros arquivos EES, executáveis ou outros *softwares*).
- Arquivo áudio-visual.
- Caixa de checagem.

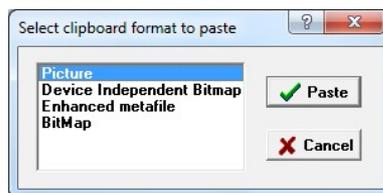
- Caixa de seleção.

Vamos inserir uma interface gráfica ao exemplo resolvido na seção 4, da função quadrática  $y=x^2$ , portanto abra o exemplo “Função quadrática.EES”. Primeiramente, é necessário obter uma imagem, que será inserida na janela de diagrama. O gráfico abaixo foi obtido para a função  $y=x^2$  usando o *software* de planilha eletrônica LibreOffice Calc, e será utilizada na interface gráfica a ser desenvolvida.

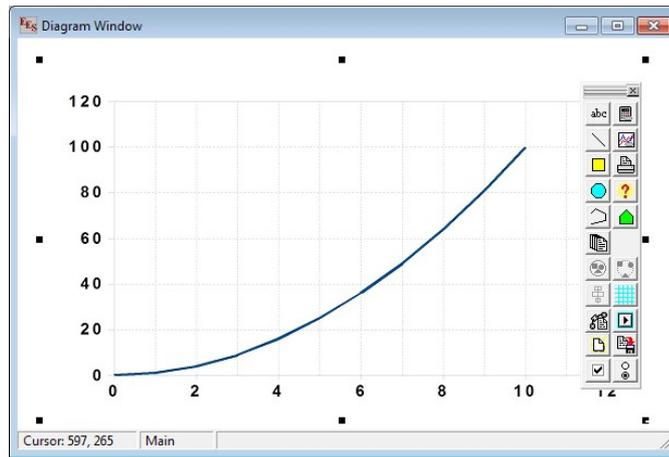


Agora, deve-se inserir o gráfico acima na “Diagram Window”. Observe que na barra de ferramentas não há uma ferramenta para adicionar figuras externas. Para fazer isto, é necessário copiar e colar a figura, porém deve-se utilizar um *software* capaz de produzir um “objeto de desenho”, tais como Corel Draw, Designer, PowerPoint, Excel, Paint, LibreOffice Calc, LibreOffice Impress, etc. Portanto, caso se deseje inserir uma figura obtida na internet, esta figura deve ser aberta com um dos *softwares* listados acima, e depois ser copiada e colada na “Diagram Window”.

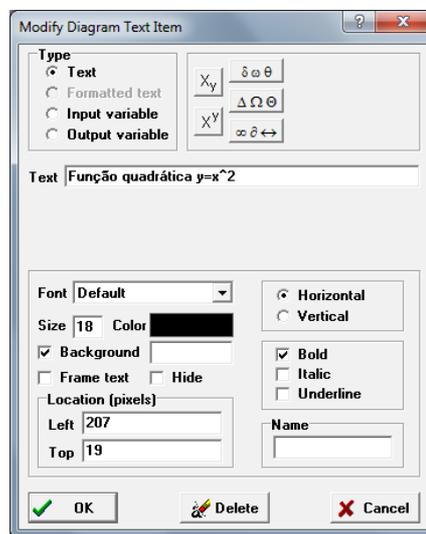
Assim, copiando a figura acima do LibreOffice Calc e colando na “Diagram Window”, aparece a janela mostrada na figura abaixo, que solicita ao usuário escolher o formato da figura a ser colada.



Selecione “Picture” e clique em “Paste”. A “Diagram Window” ficará como mostrado na figura abaixo.

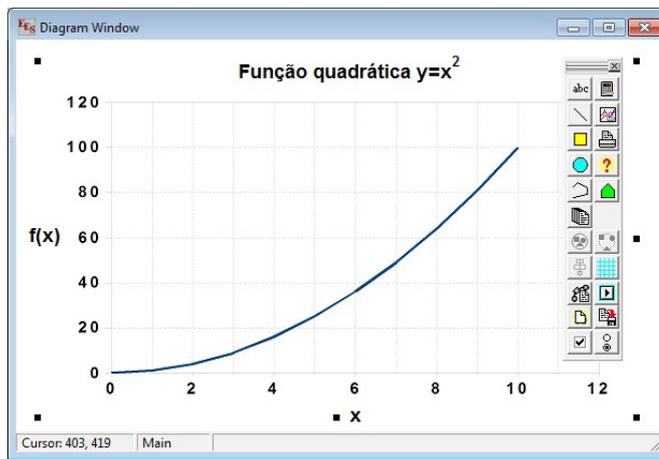


Usando, na barra de ferramentas, a ferramenta de adição de texto (a primeira da coluna esquerda), insira um título na figura, por exemplo, “Função quadrática  $y=x^2$ ”, de acordo com a figura abaixo.



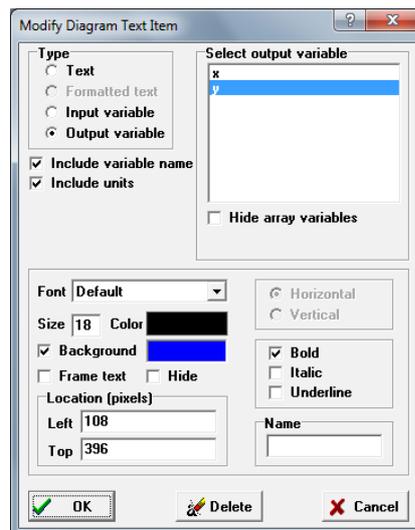
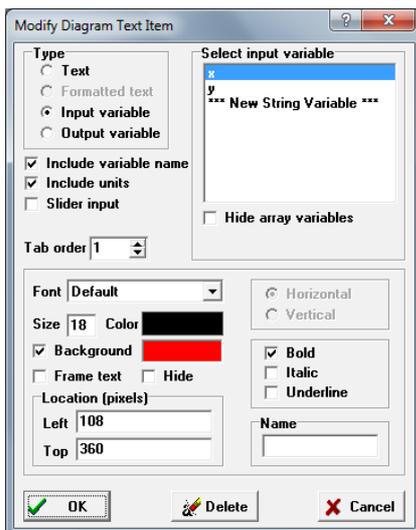
Para modificar ou corrigir algum erro basta clicar com o botão esquerdo duas vezes sobre o texto, e assim a janela acima é mostrada novamente.

Observe que na ferramenta de adição de texto, no canto superior esquerdo é possível selecionar que tipo de texto deseja-se inserir: texto (“Text”), texto formatado (“Formatted text”), variável de entrada (“Input variable”) ou variável de saída (“Output variable”). Adicione também os nomes dos eixos, e será obtida a figura abaixo.



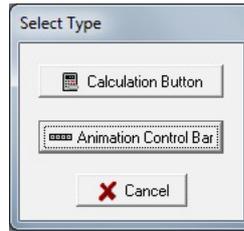
Adicionaremos, agora, as variáveis que desejarmos. Pelo fato de a rotina computacional possuir apenas duas variáveis ( $x$  e  $y$ ), não temos escolha a não ser inserir as duas: uma deve ser de entrada e a outra de saída. Escolha  $x$  como variável de entrada e  $y$  como variável de saída.

Para inserir a variável  $x$ , clique na ferramenta de adição de texto, e em “Type” selecione “Input variable”. No canto superior direito aparecerá uma janela de seleção de variável. Selecione a variável  $x$ . É importante que o usuário possa identificar e distinguir rapidamente as diferentes variáveis na interface gráfica, portanto como sugestão atribua cores diferentes para o plano de fundo das variáveis de entrada e de saída. No caso das de entrada, será escolhida a cor vermelha. Faça o mesmo procedimento para inserir a variável  $y$ , porém em “Type” selecione “Output variable” e atribua a cor azul ao seu plano de fundo. A figura abaixo à esquerda mostra como fica a janela de adição da variável  $x$ , enquanto a figura à direita mostra como fica a janela de adição da variável  $y$ .

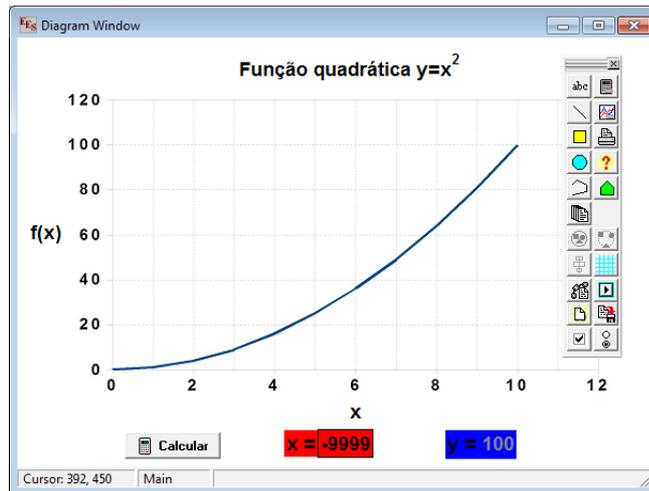


Clique em “OK” para inserir as duas variáveis. Adicione também um botão de execução usando a ferramenta de adição de botão (a primeira da coluna direita). Aparecerá a janela abaixo. Selecione “Calculation Button”. Edite o nome do botão clicando com o botão

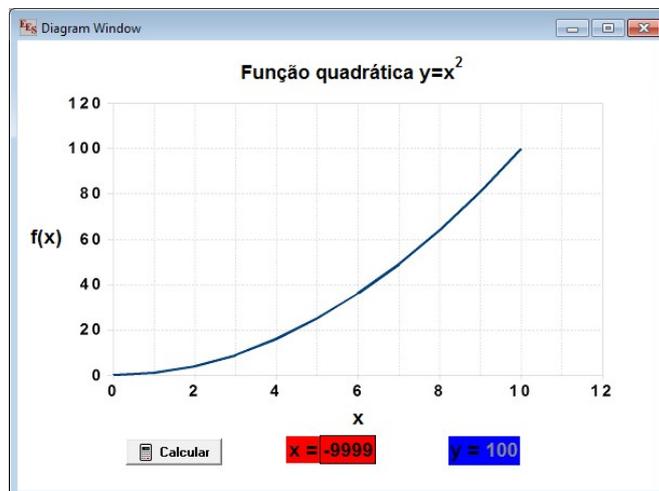
direito sobre o mesmo, e em “Caption”, digite “Calcular”.



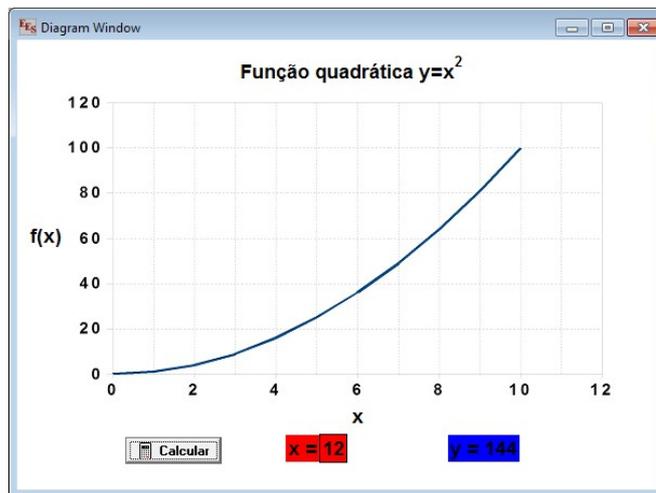
A janela de diagrama fica como mostrado na figura abaixo.



Feche a barra de ferramentas e obtém-se a janela abaixo.



Observe que na figura acima, pode-se digitar um valor para a variável  $x$ , e pressionando o botão “Calcular”, a interface gráfica determina o valor de  $y$ . Escolhendo, por exemplo,  $x=12$ , obtém-se  $y=144$ , conforme mostrado na figura abaixo.



Embora o exemplo mostrado seja bastante simples, a janela de diagrama é extremamente útil na resolução de diversas classes de problemas de engenharia, além de possibilitar obter interfaces gráficas elegantes e com qualidade para realizar apresentações.

Salve o arquivo “Função quadrática.EES” usando o atalho Ctrl+S.

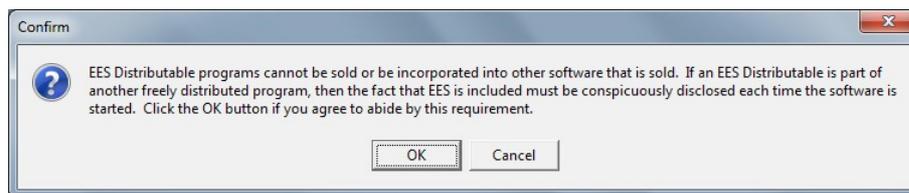
## 6. Arquivo Executável (“Make Distributable Program”)

O EES Professional oferece a possibilidade do usuário criar arquivos executáveis das rotinas computacionais desenvolvidas, o que é muito útil porque possibilita que as rotinas computacionais sejam utilizadas em computadores que não possuem o EES instalado.

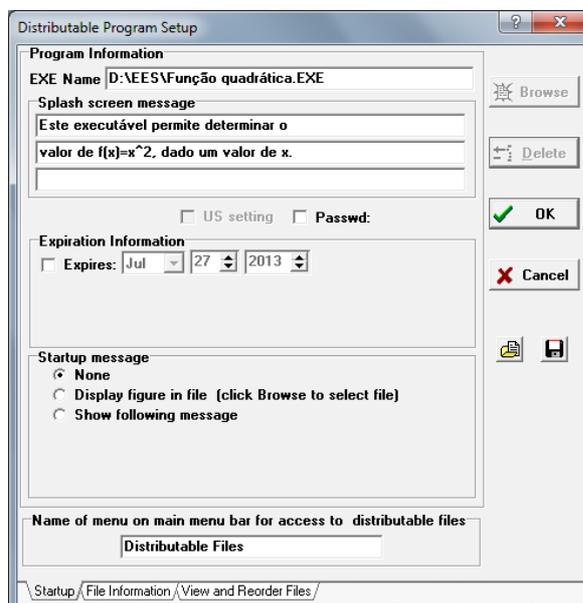
Para criar um arquivo executável é necessário ter criado, na rotina computacional, uma interface gráfica, como a desenvolvida na seção 5, pois no arquivo executável o usuário poderá alterar apenas as variáveis que constam na interface gráfica. Como exemplo, será criado um arquivo executável da interface gráfica deste exemplo citado.

Abra o arquivo “Função quadrática.EES”. Clique em “File”, e depois em “Make Distributable Program”. Aparecerá a janela de confirmação mostrada na figura abaixo, solicitando que o usuário concorde em:

- Não vender o arquivo executável, ou incorporá-lo a um outro *software* que é vendido.
- Se o arquivo executável for parte de um *software* distribuído gratuitamente, o fato de que o arquivo executável feito no EES está incluído deve ser ostensivamente divulgado cada vez que o *software* for iniciado.



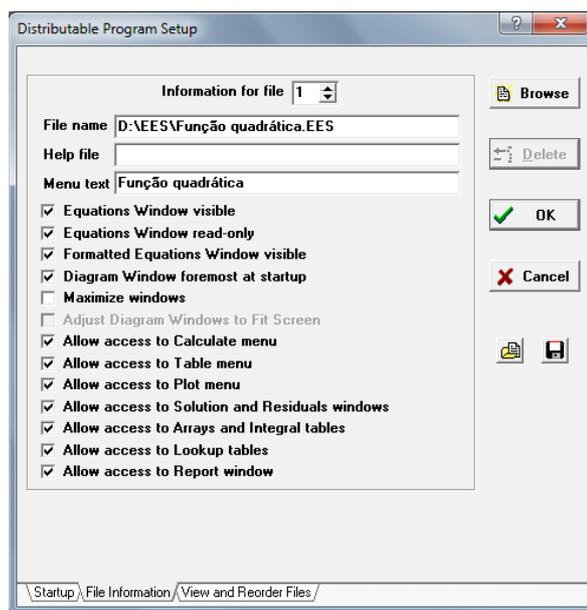
Clique em “OK”. Aparecerá a janela mostrada na figura abaixo. No rodapé da janela há três abas de informações: “Startup”, “File Information” e “View and Reorder Files”. A figura abaixo mostra a aba “Startup”.



Nesta aba é possível:

- Editar o nome do arquivo executável, no campo “EXE Name”.
- Editar a mensagem que aparecerá na tela de mensagem inicial, que aparece quando o arquivo for executado, no campo “Splash screen message”. Observe na figura acima que foi colocada a seguinte mensagem: “Este executável permite determinar o valor de  $f(x)=x^2$ , dado um valor de  $x$ ”.
- Atribuir uma senha de proteção ao arquivo executável, marcando a caixa “Passwd”. Após marcá-la, à direita surge um campo para digitar a senha.
- Atribuir uma data a partir da qual o arquivo executável deixará de funcionar, em “Expiration Information”. Após escolher a data, surge uma janela abaixo permitindo que o desenvolvedor digite uma mensagem que o usuário verá depois que o arquivo executável expirar.
- Editar uma mensagem de informação (opcional) que aparecerá logo depois da tela de mensagem inicial, em “Startup message”.

Clicando na aba “File Information”, aparece a janela mostrada na figura abaixo.



Nesta aba é possível:

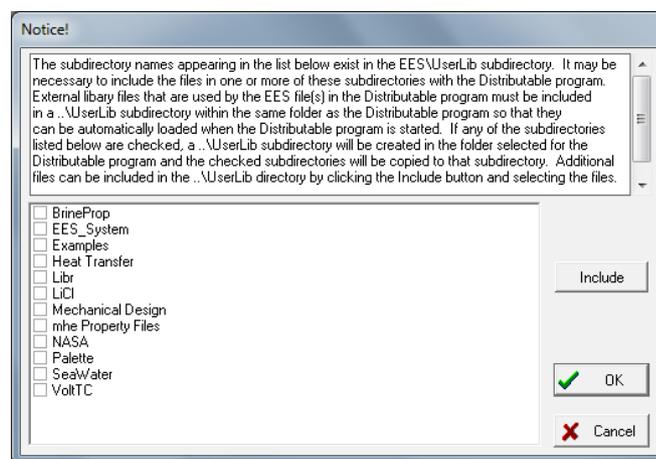
- Escolher o número de arquivos que irão gerar o arquivo executável, no campo “Information for file”. Geralmente se cria um executável a partir de um único arquivo .EES, mas pode-se gerar um único executável para vários arquivos .EES.
- Selecionar o arquivo .EES que gerará o arquivo executável, no campo “File name”.
- Anexar um arquivo-texto de ajuda no arquivo executável, no campo “Help file”.
- Personalizar o nome que aparecerá na barra de título do arquivo executável, no campo “Menu text”. Observe na figura acima que foi colocado o seguinte nome: “Função

quadrática”.

- Escolher a quais janelas o usuário do arquivo executável terá acesso, marcando ou desmarcando-as na lista que aparece abaixo de “Menu text”.

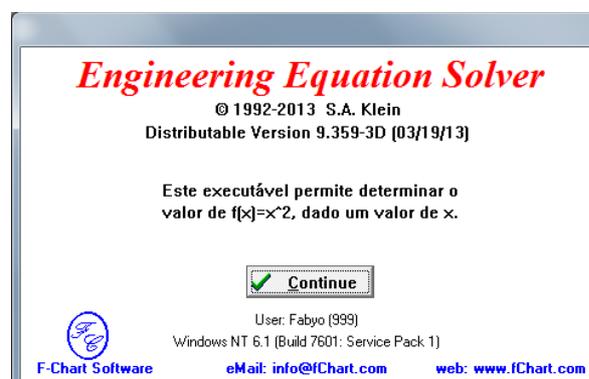
A aba “View and Reorder Files” lista os arquivos .EES que serão utilizados para gerar o arquivo executável, e possibilita alterar a ordem entre eles.

Faça as alterações que julgar necessárias nas três abas e, na aba “Startup” clique em “OK”. Será mostrada a janela de alerta abaixo, que atenta sobre a necessidade de incluir no arquivo executável alguns subdiretórios da biblioteca do EES no caso de o arquivo .EES utilizar alguma biblioteca externa, por exemplo. Como o exemplo feito não utiliza alguma biblioteca externa, clique em “OK”.



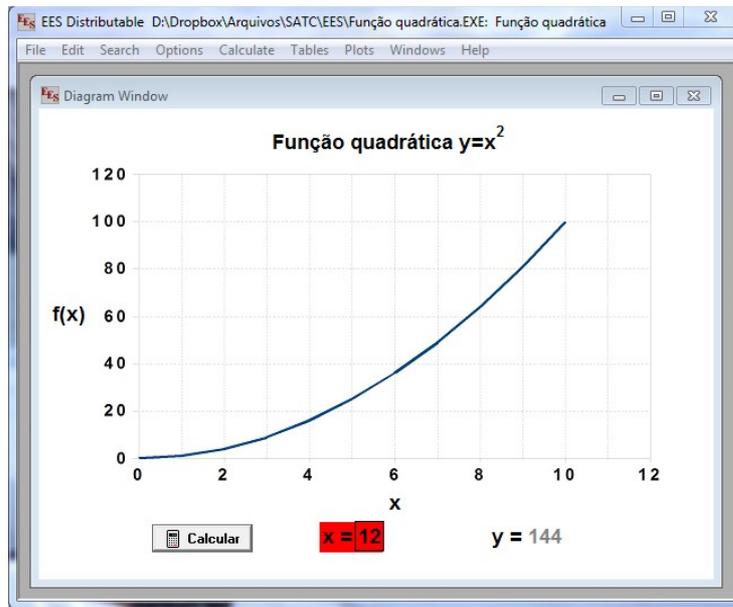
O EES iniciará a compilação do arquivo executável, um processo que geralmente demora entre 20 a 60 segundos, dependendo da máquina.

Vá até a pasta escolhida para salvar o arquivo executável e verifique que foi criado o arquivo “Função quadrática.EXE”. Ao abri-lo, aparece a janela de diálogo mostrada na figura abaixo.



Clique em continue e o arquivo executável aparecerá, como mostrado na figura abaixo. Explore na barra de menus as funcionalidades, e observe que em “Windows”, “Equations”, é impossível editar a rotina computacional. O usuário pode, entretanto, entrar com um valor de x qualquer, e clicando em “Calculate” o executável calcula o valor de y

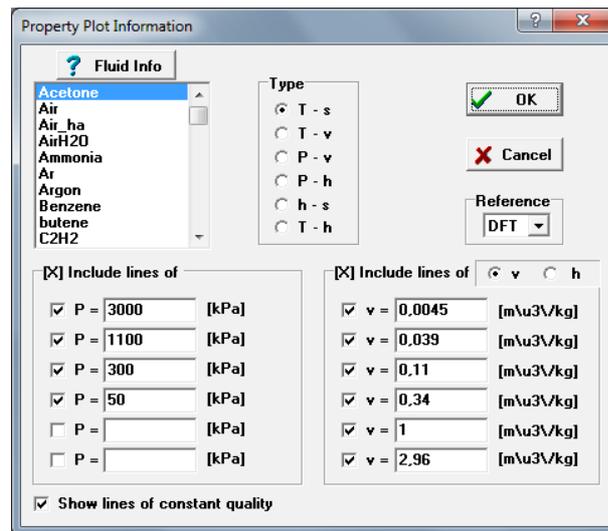
correspondente. Como já dito, a grande vantagem de gerar um arquivo executável é que o mesmo pode ser utilizado em um computador que não possui o EES instalado.



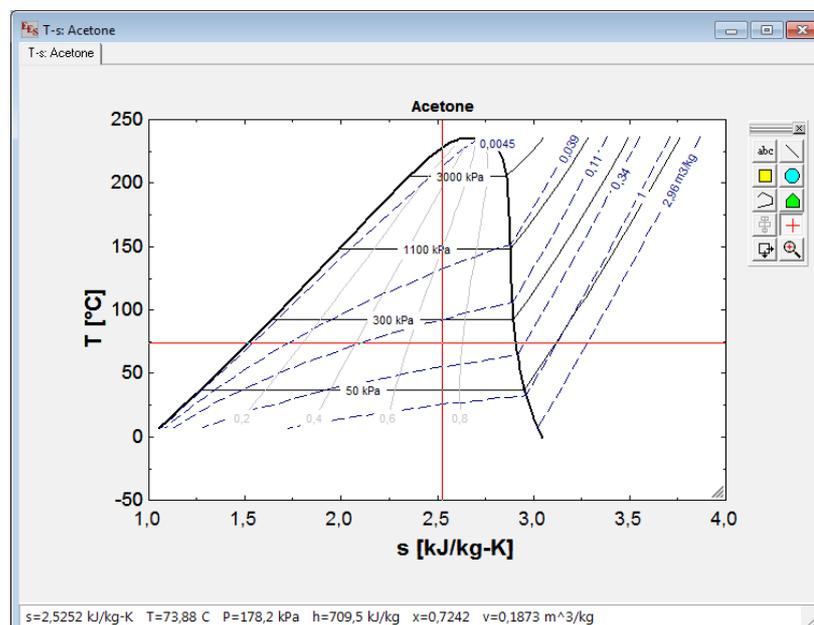
## 7. Diagramas Termodinâmicos de Propriedades (“Property Plots”)

É possível plotar e consultar os diagramas termodinâmicos de propriedades para as substâncias que constam na biblioteca do EES.

Clique em “Plots” e depois em “Property Plot”, ou clique no ícone respectivo na barra de ferramentas (veja Tabela 1.1). Abrirá a janela mostrada abaixo.



Observe que é possível selecionar: a substância na janela seletora superior à esquerda (está selecionada a acetona), o tipo de diagrama termodinâmico na região central superior (está selecionado o diagrama T-s), incluir linhas de propriedades termodinâmicas constantes (no caso pode-se selecionar, para o diagrama T-s, linhas de pressão, volume específico ou entalpia constante), e habilitar a grafia das linhas de título constante na parte inferior à esquerda. Clicando em “OK”, obtém-se o diagrama T-s mostrado abaixo.



Próximo ao canto superior à direita há uma barra de ferramentas para o gráfico, onde se pode adicionar texto, figuras geométricas (possibilita esboçar ciclos termodinâmicos nos diagramas), mover o gráfico, aplicar zoom e habilitar as barras cruzadas (mostradas em vermelho na figura acima). No canto inferior direito do diagrama é possível redimensioná-lo.

Observe que com o comando das barras cruzadas ativado, no rodapé da janela do diagrama aparecem todas as propriedades termodinâmicas relativas ao ponto onde o *mouse* está repousando.

## 8. Exemplos Resolvidos

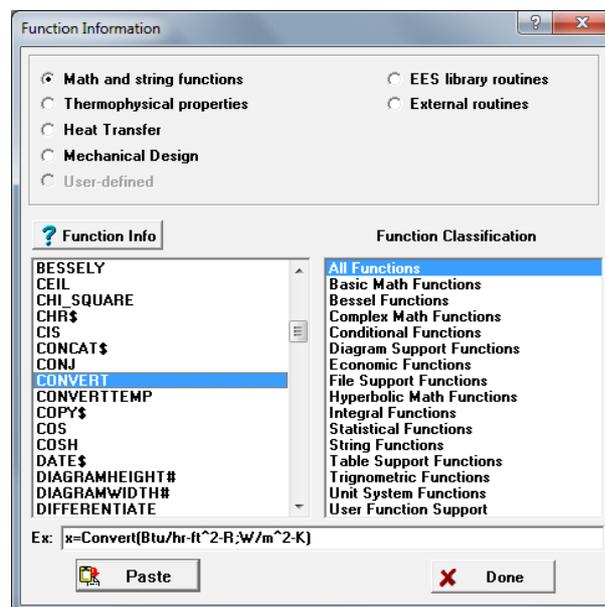
Nesta seção são resolvidos, passo a passo, exemplos simples que exploram algumas das potencialidades do EES, objetivando agregar domínio prático do uso do *software* e permitir que o estudante seja capaz de modelar e resolver outros problemas de engenharia.

### 8.1. Conversão de Unidades

Nos exemplos desta seção, será explorada a capacidade do EES em realizar a conversão de unidades usando a função matemática “Convert”.

#### 8.1.1. Conversões Simples

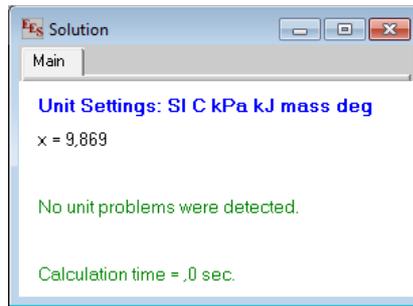
Suponha que se deseja converter uma pressão de 1000 kPa para a unidade atm. Será necessário utilizar a função “Convert”, e para isso abra o EES, clique em “Options”, e depois em “Function Info”, ou use o atalho Ctrl+Alt+F. Na lista de funções abaixo à esquerda, selecione “CONVERT” e clique em “Paste”, conforme mostrado na figura abaixo.



Observe que a função foi colada na janela de equações. Após o sinal de igual, digite 1000\* e substitua o conteúdo dos parênteses por (kPa;atm), obtendo a sintaxe mostrada na figura abaixo.

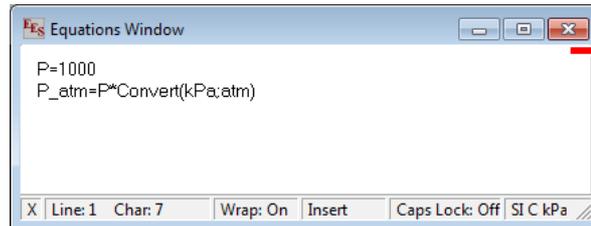


Execute a rotina computacional pressionando F2. Aparecerá a janela de soluções mostrada abaixo, mostrando o resultado:  $1000 \text{ kPa} = 9,869 \text{ atm}$ .

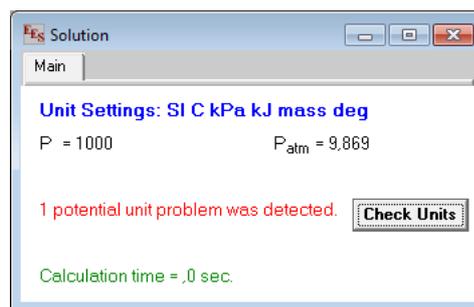


Ao utilizar a função “Convert”, não importa quais são as unidades padrão definidas no sistema de unidades padrão (para verificá-las, clique em “Options” e depois em “Unit System”), pois observe que a sintaxe da função “Convert” exige que se declare as unidades inicial (no caso, kPa) e final (atm). Assim, mesmo que no sistema de unidades padrão a pressão fosse definida com a unidade bar, para converter de kPa para atm a sintaxe seria a mesma utilizada neste exemplo.

Uma outra forma de resolver o mesmo exemplo seria utilizando a sintaxe mostrada na figura abaixo.



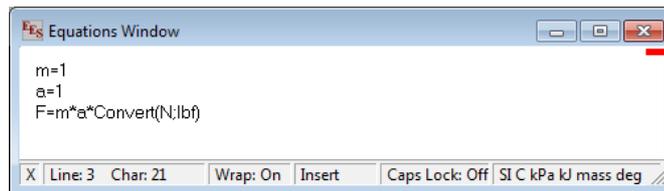
A solução, neste caso, fica como mostrado na figura abaixo.



Observe que na janela de soluções aparece uma mensagem em vermelho alertando que foi detectado um potencial problema relativo às unidades das variáveis. Caso o usuário esteja desenvolvendo uma rotina computacional complexa, este problema deve ser obrigatoriamente resolvido, porém sua solução é optativa no caso do desenvolvimento de rotinas computacionais para consultas rápidas. Como o exemplo resolvido é simples, neste momento não será dada atenção à solução deste problema. Caso o usuário queira resolvê-lo, a seção 8.2.3 explica como fazê-lo.

### 8.1.2. Conversões em Equações

A função “Convert” pode também ser utilizada em equações. Suponha que uma massa de 1 kg sofre uma aceleração de  $1 \text{ m/s}^2$ , e portanto a força aplicada sobre a massa é dada pelo produto da massa e da aceleração, que resulta em 1 N. Mas digamos que conhecendo a massa em kg e a aceleração em  $\text{m/s}^2$ , deseja-se obter o valor da força não em N, e sim na unidade inglesa lbf. A sintaxe mostrada na figura abaixo mostra como resolver este exemplo.

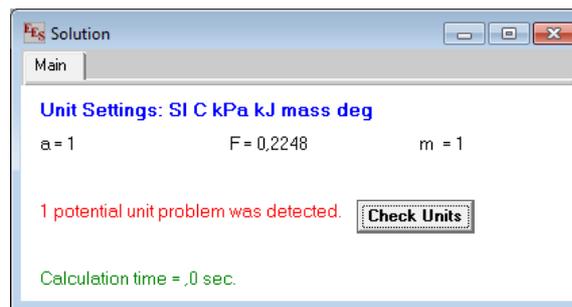


```

EES Equations Window
m=1
a=1
F=m*a*Convert(N;lbf)
X Line: 3 Char: 21 Wrap: On Insert Caps Lock: Off SI C kPa kJ mass deg

```

Execute a rotina computacional pressionando F2. Aparecerá a janela de soluções mostrada abaixo, mostrando que a força de  $1 \text{ N} = 0,2248 \text{ lbf}$ . Observe que novamente aparece uma mensagem alertando sobre um potencial problema relativo às unidades.



```

EES Solution
Main
Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg
a = 1          F = 0,2248          m = 1
1 potential unit problem was detected. Check Units
Calculation time = ,0 sec.

```

Conforme já visto, na seção 3 pode-se consultar a lista de informações de unidades e conversões das grandezas físicas.

## 8.2. Propriedades Termodinâmicas

Este exemplo, bastante corriqueiro na disciplina de termodinâmica, consiste em determinar o valor de algumas propriedades termodinâmicas, sendo conhecidas duas propriedades termodinâmicas independentes.

Suponha que se deseja determinar a pressão de saturação, a entalpia e a entropia da água no estado de líquido saturado, sendo conhecida a temperatura da água.

### 8.2.1. Rotina Computacional

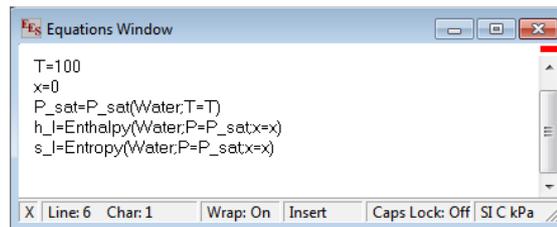
Primeiramente deve-se escrever a rotina computacional na janela de equações (“Equations Window”). Neste exemplo, identificam-se as seguintes variáveis:

- Variáveis de entrada:
  - Temperatura (T), a qual deve-se atribuir um valor qualquer, por exemplo 100°C.
  - Título (x), que deve ser zero, pois o estado analisado é de líquido saturado.

Observe que as variáveis de entrada são duas propriedades termodinâmicas independentes. Como se pode determinar a entalpia e a entropia em função de qualquer par de propriedades independentes, elas serão determinadas em função de T e x.

- Variáveis de saída (devem ser funções inseridas de acordo com a seção 2.2.2):
  - Pressão de saturação ( $P_{\text{sat}}$ ):  $P_{\text{sat}} = f(T)$ .
  - Entalpia de líquido saturado ( $h_l$ ):  $h_l = f(P_{\text{sat}}, x) = f(T, x)$ .
  - Entropia de líquido saturado ( $s_l$ ):  $s_l = f(P_{\text{sat}}, x) = f(T, x)$ .

Execute o EES, e na “Equations Window” digite a sintaxe mostrada na figura abaixo (observe que não foram declaradas as unidades das variáveis).

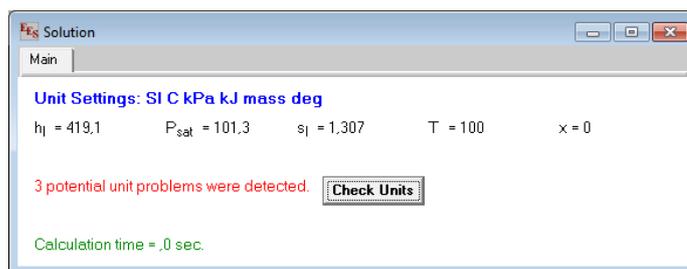


```

EES Equations Window
T=100
x=0
P_sat=P_sat(Water;T=T)
h_l=Enthalpy(Water;P=P_sat;x=x)
s_l=Entropy(Water;P=P_sat;x=x)
  
```

### 8.2.2. Executando a Rotina

Execute a rotina pressionando F2, e se obtém a janela de soluções mostrada abaixo.



```

EES Solution
Main
Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg
h_l = 419,1    P_sat = 101,3    s_l = 1,307    T = 100    x = 0
3 potential unit problems were detected. [Check Units]
Calculation time = .0 sec.
  
```

O problema foi resolvido, e obtiveram-se as respostas para  $P_{\text{sat}}$ ,  $h_l$  e  $s_l$ , porém observe que os valores de todas as variáveis não possuem unidade especificada, incluindo a temperatura e a pressão, que de acordo com a Figura 2 já foram definidas no sistema de unidades padrão. Logo, na janela de soluções aparece a mensagem em vermelho alertando que foram detectados três potenciais problemas de unidades.

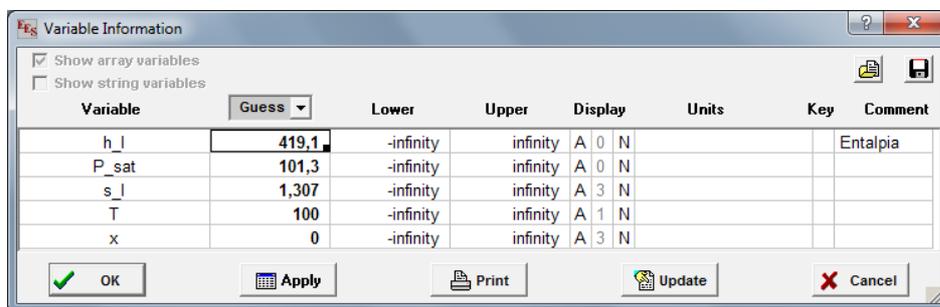
Esta inconsistência física deve ser resolvida caso o usuário esteja desenvolvendo uma rotina computacional complexa. Sua solução é optativa no caso do desenvolvimento de

rotinas computacionais para consultas rápidas, desde que o usuário conheça as unidades das variáveis de entrada.

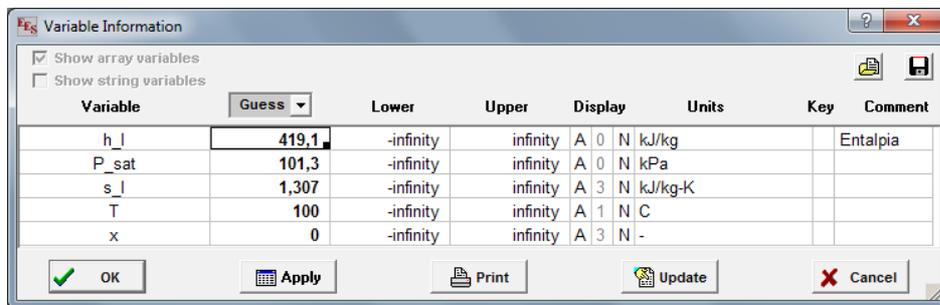
### 8.2.3. Alerta de Unidades

O alerta de problemas nas unidades só é eliminado quando se atribui unidades corretas às variáveis. Há duas formas de fazer isso, as quais são idênticas em relação ao resultado:

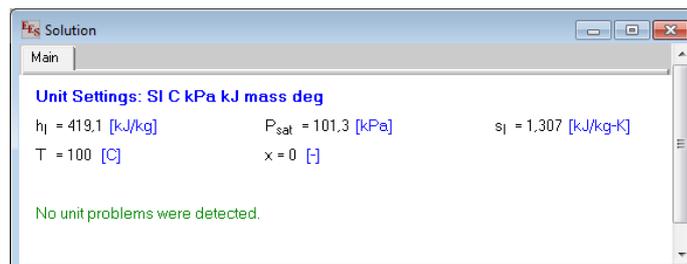
- Usando o comando de informações de variáveis: Clique em “Options” e depois em “Variable Info”, ou clique no ícone respectivo na barra de ferramentas (veja Tabela 1.1), ou use o atalho F9. Aparecerá a seguinte janela, onde pode-se editar as unidades das variáveis na coluna “Units”.



Após adicionar manualmente as unidades no SI ( $h_l$  [kJ/kg],  $P_{sat}$  [kPa],  $s_l$  [kJ/kg-K],  $T$  [C] e  $x$  [-]), a janela ficará da seguinte forma:



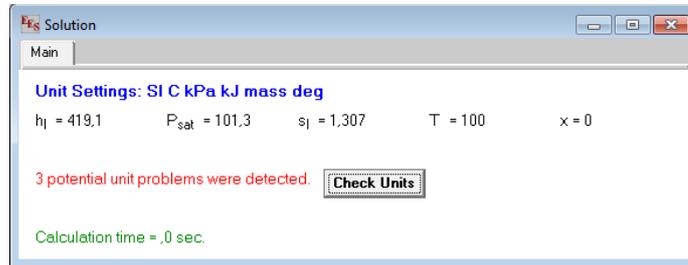
Clique em “OK”. Ao executar novamente a rotina (F2), agora a janela de soluções mostra as unidades ao lado de cada variável, e não há mais a mensagem de problemas com as unidades, como mostrado abaixo.



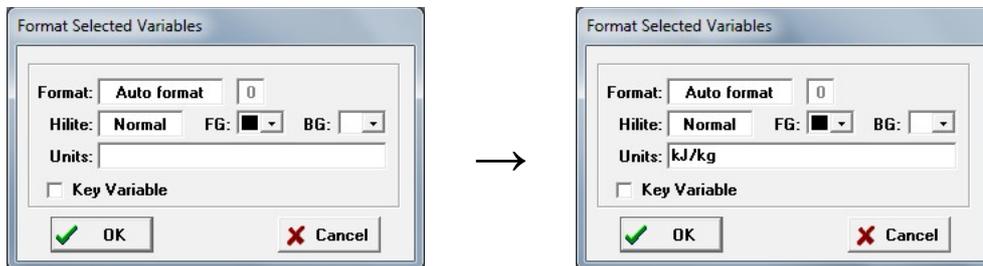
Como exemplo, sugere-se que o usuário edite a unidade da entalpia, trocando kJ/kg

por J/kg, e se observará que volta a ocorrer o problema com as unidades.

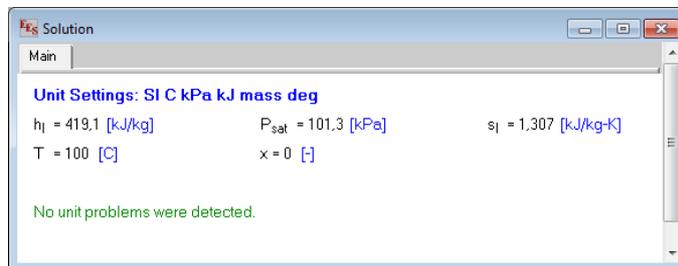
- Editando as variáveis diretamente na janela de soluções: Como já visto, após executar a rotina computacional aparece a janela de soluções abaixo.



Clicando com o botão direito em cima de cada variável na janela de soluções, aparece a janela de formatação de variáveis (“Format Selected Variables”), que é mostrada abaixo à esquerda, na qual pode-se atribuir a unidade para cada variável. Observe que também é possível atribuir: a formatação e o número de algarismos significativos ao valor da variável (“Format”); efeitos e cor da fonte e cor de fundo (“Hilite”); o caráter de variável-chave e descrevê-la, e assim ela é listada em outra aba (“Key Variable”). Para a entalpia, por exemplo, a unidade no SI é kJ/kg, e assim a janela de formatação de variáveis fica da forma mostrada abaixo à direita.



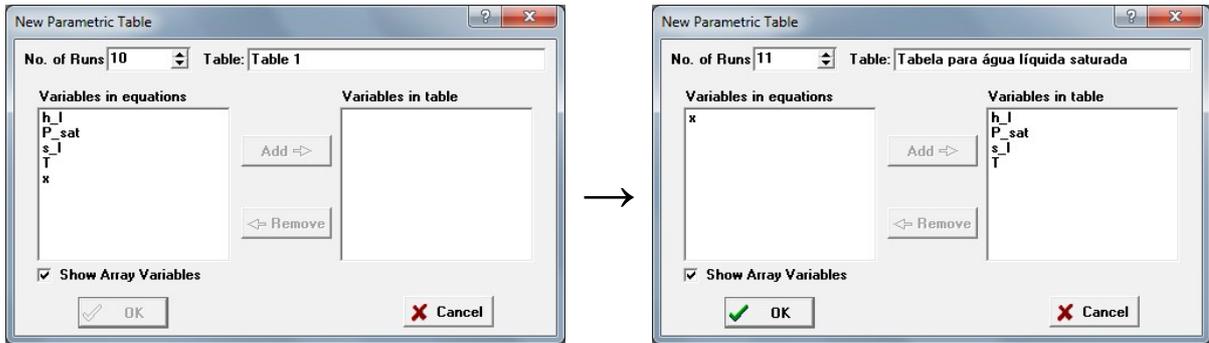
Assim, editando uma a uma cada variável, resolve-se o problema de unidades, como mostrado na figura abaixo.



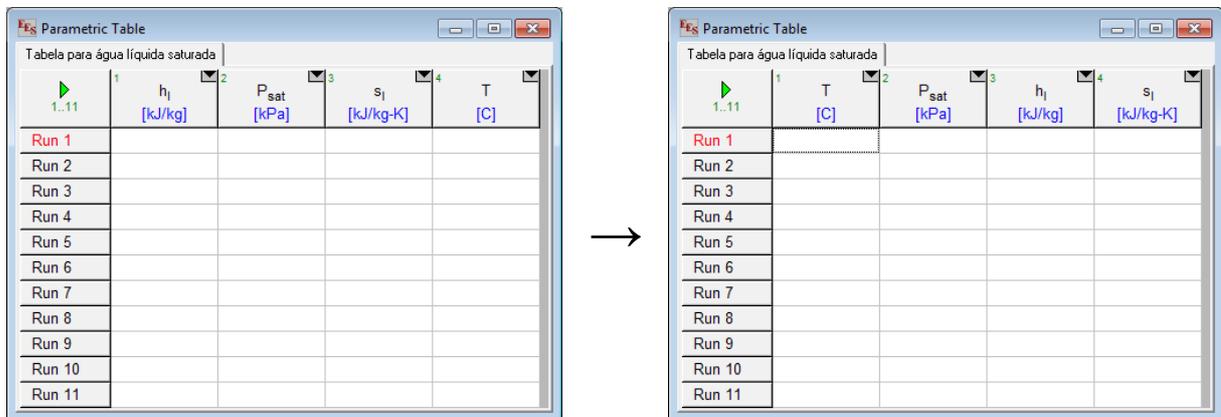
### 8.2.4. Tabela Paramétrica

Agora vamos implementar no exemplo uma tabela paramétrica capaz de calcular, para água líquida saturada, a pressão de saturação, a entalpia e a entropia ao variar a temperatura de 100 a 200°C (de 10 em 10°C).

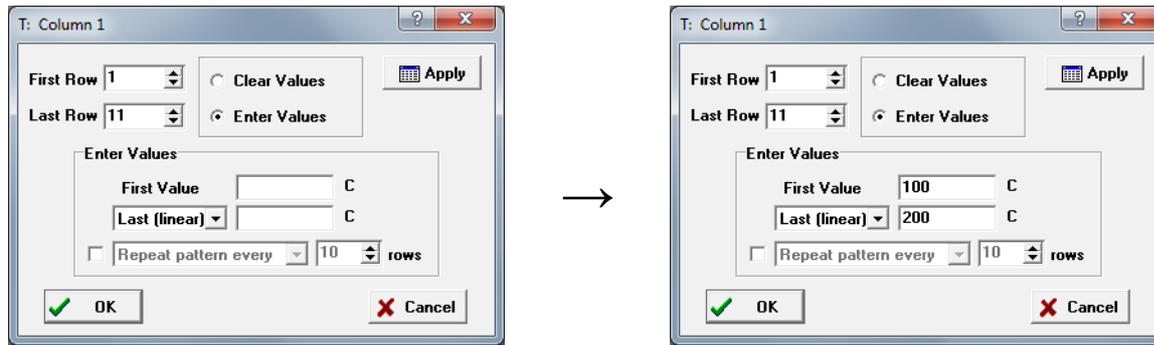
Clique em “Tables”, e depois em “New Parametric Table”. Aparecerá a janela mostrada abaixo à esquerda. Como se deseja que a tabela calcule as propriedades para água líquida saturada, selecione todas as variáveis na janela “Variables in equations”, exceto o título x, pois seu valor deve ser fixo e igual a zero, conforme consta na rotina computacional desenvolvida. Clique em “Add”. Altere o número de linhas para 11 e nomeie a tabela como “Tabela para água líquida saturada”. A janela ficará como a mostrada abaixo à direita.



Clique em “OK”. Aparecerá a tabela mostrada abaixo à esquerda. Coloque as colunas na ordem apresentada na figura abaixo à direita. Para fazer isso, clique com o botão esquerdo no cabeçalho de cada coluna (a região onde consta o nome da variável), e sem soltar o botão arraste até a posição desejada.



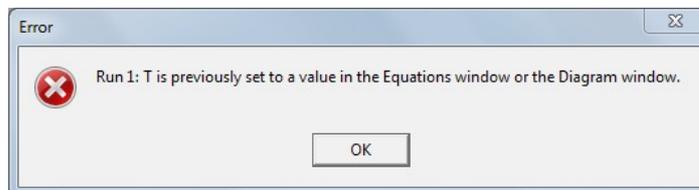
Vimos que  $P_{\text{sat}} = f(T)$ ,  $h_l = f(T;x)$  e  $s_l = f(T;x)$ , entretanto como x será fixo e igual a zero, então temos que  $P_{\text{sat}}$ ,  $h_l$  e  $s_l$  são funções apenas da temperatura, ou seja:  $P_{\text{sat}} = f(T)$ ,  $h_l = f(T)$  e  $s_l = f(T)$ . Logo, devemos escolher T como variável de entrada. Deve-se fazer a temperatura variar de 100 a 200°C, de 10 em 10°C. Para isto, clique em “Alter values”. Aparecerá a janela mostrada na figura abaixo à esquerda. Em “First Value”, digite 100, e em “Last (linear)” digite 200. A janela ficará como a mostrada abaixo à direita.



Clique em “Apply” e verifique na tabela se as temperaturas foram inseridas de 10 em 10°C. Clique em “OK”. A tabela paramétrica ficará como a mostrada abaixo.

Run	T [C]	P <sub>sat</sub> [kPa]	h <sub>l</sub> [kJ/kg]	s <sub>l</sub> [kJ/kg-K]
Run 1	100			
Run 2	110			
Run 3	120			
Run 4	130			
Run 5	140			
Run 6	150			
Run 7	160			
Run 8	170			
Run 9	180			
Run 10	190			
Run 11	200			

Resolva a tabela paramétrica clicando na seta verde mostrada na figura acima. Novamente aparecerá uma janela indicando que ocorreu um erro, mostrada abaixo.



Vá na janela de equações (“Equations Window”) e comente o valor atribuído à variável T colocando-a entre aspas duplas, da maneira mostrada na figura abaixo.

```

"T=100"
x=0
P_sat=P_sat(Water,T=T)
h_l=Enthalpy(Water,P=P_sat,x=x)
s_l=Entropy(Water,P=P_sat,x=x)

```

Caso a tabela paramétrica tivesse mais de uma variável a qual foram atribuídos valores, por exemplo 4 variáveis, seria necessário comentar (ou excluir) todos os valores atribuídos a essas variáveis na janela de equações. Executando novamente a tabela paramétrica, a mesma retorna os resultados mostrados na figura abaixo.

	1	2	3	4
	T [C]	P <sub>sat</sub> [kPa]	h <sub>l</sub> [kJ/kg]	s <sub>l</sub> [kJ/kg-K]
Run 1	100	101,3	419,1	1,307
Run 2	110	143,2	461,3	1,419
Run 3	120	198,5	503,8	1,528
Run 4	130	270	546,4	1,635
Run 5	140	361,2	589,2	1,739
Run 6	150	475,7	632,3	1,842
Run 7	160	617,7	675,7	1,943
Run 8	170	791,5	719,3	2,042
Run 9	180	1002	763,2	2,14
Run 10	190	1254	807,6	2,236
Run 11	200	1554	852,4	2,331

Caso deseje que  $h_l$  seja mostrado com dois algarismos significativos depois da vírgula, na janela de soluções clique com o botão direito sobre a variável  $h_l$ , em “Format” selecione “Fixed decimal”, e na janela seletora à direita escolha 2. Abra a janela da tabela paramétrica e observe que ela estará como a mostrada na figura abaixo.

	1	2	3	4
	T [C]	P <sub>sat</sub> [kPa]	h <sub>l</sub> [kJ/kg]	s <sub>l</sub> [kJ/kg-K]
Run 1	100	101,3	419,06	1,307
Run 2	110	143,2	461,34	1,419
Run 3	120	198,5	503,78	1,528
Run 4	130	270	546,41	1,635
Run 5	140	361,2	589,24	1,739
Run 6	150	475,7	632,32	1,842
Run 7	160	617,7	675,65	1,943
Run 8	170	791,5	719,28	2,042
Run 9	180	1002	763,25	2,14
Run 10	190	1254	807,60	2,236
Run 11	200	1554	852,38	2,331

Salve o exemplo com o nome “Tabela termodinâmica”.

### 8.3. Turbina a Vapor Ideal

Neste exemplo, será modelada uma turbina a vapor ideal, na qual a vazão ou fluxo mássico de vapor é 56,73 kg/s. O vapor entra na turbina a 540°C e 14.000 kPa, e sai a 45°C. Deve-se determinar o trabalho específico ( $w_t$ ) e a potência ( $\dot{W}_t$ ) gerados no eixo pela turbina.

#### 8.3.1. Modelagem Física e Matemática

A Figura 5 mostra a representação da turbina a vapor que será modelada. O vapor a alta pressão e alta temperatura, proveniente de uma caldeira, entra pelo ponto 1 (entrada) e expande ao passar pelos estágios da turbina. Esta expansão movimentada as pás da turbina (ligadas ao eixo da mesma), gerando trabalho mecânico (potência) quando o eixo gira. Após expandir, o vapor (na realidade uma mistura de vapor e líquido saturados) com baixa pressão

e baixa temperatura deixa a turbina pelo ponto 2 (saída) e se dirige ao condensador.

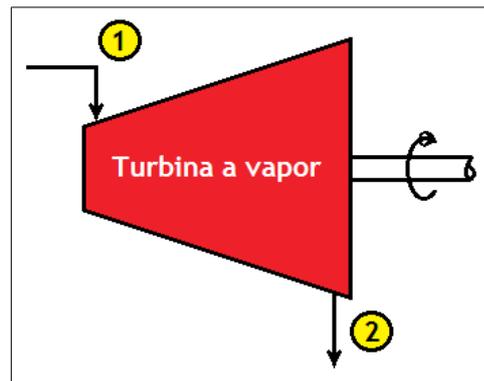


Figura 5: Representação da turbina a vapor modelada.

O processo que ocorre durante a expansão do vapor será modelado:

- Considerando regime permanente, ou seja, não há variação temporal das variáveis.
- Como sendo adiabático e reversível, ou seja, a expansão será modelada como sendo isentrópica (ideal), onde a entropia do vapor se mantém constante.

Considerando a turbina como volume de controle, aplicando a equação da conservação da massa (lei da continuidade), tem-se que a variação temporal da massa contida no volume de controle (turbina), somada ao fluxo de massa que sai do volume de controle e subtraída do fluxo de massa que entra no volume de controle deve ser nula:

$$\frac{d m_t}{d t} + \sum \dot{m}_2 - \sum \dot{m}_1 = 0 \quad (8.1)$$

Como o regime é permanente, a variação temporal da massa contida no volume de controle é nula, e como só há uma seção por onde entra massa (ponto 1) e também só uma seção por onde sai massa (ponto 2), a equação 8.1 fica:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad \rightarrow \quad \dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m} \quad (8.2)$$

Ou seja, o fluxo de massa que entra pelo ponto 1 é igual ao fluxo de massa que sai pelo ponto 2. Aplicando a 1ª Lei da Termodinâmica para um volume de controle envolvendo a turbina, tem-se:

$$\dot{Q}_t + \dot{m}_1 \cdot \left( h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g \cdot Z_1 \right) = \frac{d E_t}{d t} + \dot{m}_2 \cdot \left( h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g \cdot Z_2 \right) + \dot{W}_t \quad (8.3)$$

Como o regime é permanente, o primeiro termo do lado direito é nulo, e aplicando a equação 8.2 na equação 8.3, tem-se:

$$\dot{Q}_t + \dot{m} \cdot \left( h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g \cdot Z_1 \right) = \dot{m} \cdot \left( h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g \cdot Z_2 \right) + \dot{W}_t \quad (8.4)$$

Como o processo é adiabático, não há fluxo de calor entrando ou saindo pela carcaça da turbina, exceto os associados aos pontos 1 e 2, e assim a equação 8.5 fica:

$$\dot{m} \cdot \left( h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g \cdot Z_1 \right) = \dot{m} \cdot \left( h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g \cdot Z_2 \right) + \dot{W}_t \quad (8.5)$$

Desprezando variações de energia cinética e potencial, a equação 8.5 finalmente nos permite quantificar a potência produzida pela turbina [kW]:

$$\dot{m} \cdot h_1 = \dot{m} \cdot h_2 + \dot{W}_t \quad \rightarrow \quad \dot{W}_t = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) \quad (8.6)$$

O trabalho específico [kJ/kg] é obtido a partir do quociente entre a potência produzida pela turbina e a vazão de vapor:

$$w_t = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = \frac{\dot{m} \cdot (h_1 - h_2)}{\dot{m}} \quad \rightarrow \quad w_t = h_1 - h_2 \quad (8.7)$$

### 8.3.2. Rotina Computacional

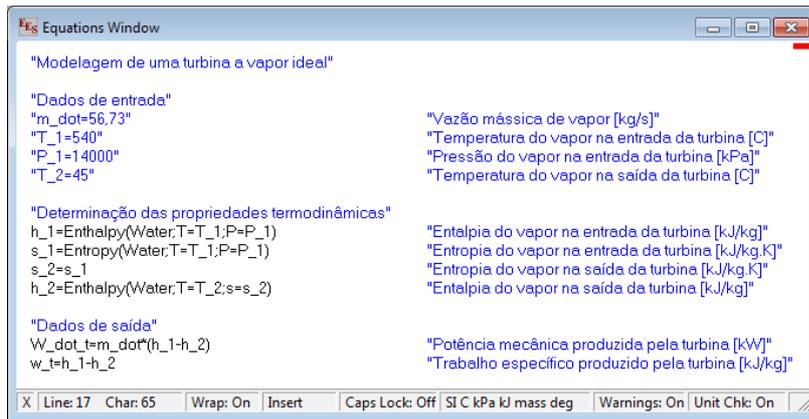
Conhecemos os seguintes dados de entrada: vazão mássica de vapor ( $\dot{m}=56,73$  kg/s), temperatura do vapor na entrada da turbina ( $T_1=540^\circ\text{C}$ ), pressão do vapor na entrada da turbina ( $P_1=14.000$  kPa), e temperatura do vapor na saída da turbina ( $T_2=45^\circ\text{C}$ ).

Como estamos considerando que a expansão é isentrópica, a entropia do vapor na entrada da turbina ( $s_1$ ) e a entropia do vapor na saída da turbina ( $s_2$ ) são iguais, e é esta informação que permite determinar o estado termodinâmico do vapor na saída da turbina.

Para determinar as variáveis de saída – o trabalho específico gerado pela turbina ( $w_t$ ), e a potência mecânica gerada pela turbina ( $\dot{W}_t$ ) – de acordo com as equações 8.6 e 8.7 é necessário determinar as entalpias do vapor na entrada e na saída ( $h_1$  e  $h_2$ ). Como é necessário conhecer duas propriedades independentes de um estado termodinâmico para poder determinar qualquer outra propriedade deste estado, tem-se que:

- A entalpia do vapor na entrada será determinada em função de  $T_1$  e  $P_1$ :  $h_1 = f(T_1; P_1)$ .
- A entalpia do vapor na saída será determinada em função de  $T_2$  e  $s_2$ :  $h_2 = f(T_2; s_2)$ .

Execute o EES, e insira na “Equations Window” a sintaxe mostrada na figura abaixo.



```

"Modelagem de uma turbina a vapor ideal"

"Dados de entrada"
"m_dot=56,73"
"T_1=540"
"P_1=14000"
"T_2=45"

"Determinação das propriedades termodinâmicas"
h_1=Enthalpy(Water,T=T_1,P=P_1)
s_1=Entropy(Water,T=T_1,P=P_1)
s_2=s_1
h_2=Enthalpy(Water,T=T_2,s=s_2)

"Dados de saída"
W_dot_t=m_dot*(h_1-h_2)
w_t=h_1-h_2

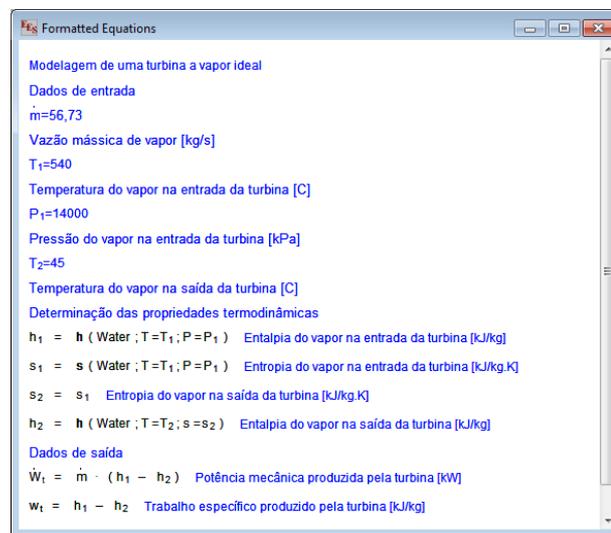
"Vazão mássica de vapor [kg/s]"
"Temperatura do vapor na entrada da turbina [C]"
"Pressão do vapor na entrada da turbina [kPa]"
"Temperatura do vapor na saída da turbina [C]"

"Entalpia do vapor na entrada da turbina [kJ/kg]"
"Entropia do vapor na entrada da turbina [kJ/kg.K]"
"Entropia do vapor na saída da turbina [kJ/kg.K]"
"Entalpia do vapor na saída da turbina [kJ/kg]"

"Potência mecânica produzida pela turbina [kW]"
"Trabalho específico produzido pela turbina [kJ/kg]"

```

Pressione F10 e aparecerá a janela de equações formatadas em notação matemática, como mostrado na figura abaixo.



```

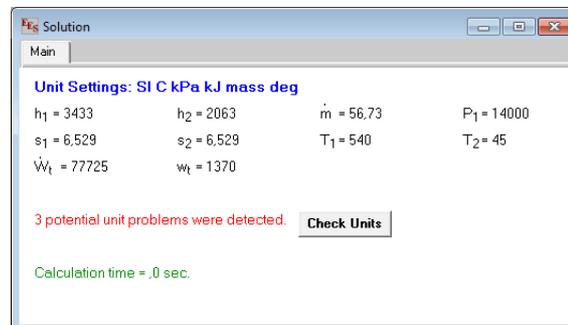
Modelagem de uma turbina a vapor ideal
Dados de entrada
m=56,73
Vazão mássica de vapor [kg/s]
T1=540
Temperatura do vapor na entrada da turbina [C]
P1=14000
Pressão do vapor na entrada da turbina [kPa]
T2=45
Temperatura do vapor na saída da turbina [C]
Determinação das propriedades termodinâmicas
h1 = h ( Water ; T=T1; P=P1 ) Entalpia do vapor na entrada da turbina [kJ/kg]
s1 = s ( Water ; T=T1; P=P1 ) Entropia do vapor na entrada da turbina [kJ/kg.K]
s2 = s1 Entropia do vapor na saída da turbina [kJ/kg.K]
h2 = h ( Water ; T=T2; s=s2 ) Entalpia do vapor na saída da turbina [kJ/kg]
Dados de saída
Wt = m · ( h1 - h2 ) Potência mecânica produzida pela turbina [KW]
wt = h1 - h2 Trabalho específico produzido pela turbina [kJ/kg]

```

Salve o arquivo com o nome “Turbina a vapor ideal.EES”.

### 8.3.3. Executando a Rotina

Execute a rotina pressionando F2, e se obtém a janela de soluções mostrada abaixo.



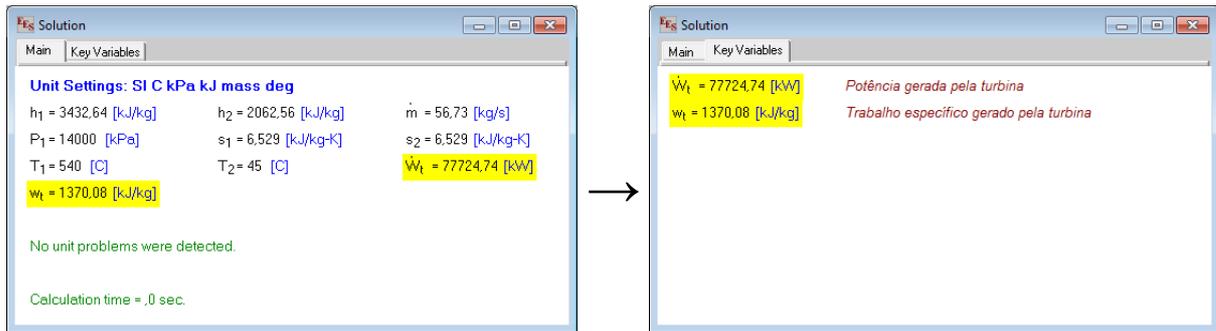
```

EES Solution
Main
Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg
h1 = 3433      h2 = 2063      m_dot = 56.73      P1 = 14000
s1 = 6.529     s2 = 6.529     T1 = 540          T2 = 45
W_dot_t = 77725  w_t = 1370
3 potential unit problems were detected. Check Units
Calculation time = .0 sec.

```

Clique em “Options”, e depois em “Variable Info”, ou use o atalho F9, e edite cada uma das variáveis para resolver o alerta sobre problemas nas unidades, e edite também o formato dos números. Opcionalmente, atribua outra cor para as variáveis de saída ou atribua a

elas o caráter de variável-chave (“Key Variable”), onde elas serão listadas em outra aba, conforme mostrado nas figuras abaixo.



Salve o arquivo usando o atalho Ctrl+S.

### 8.3.4. Tabela Paramétrica

O poder e a capacidade das tabelas paramétricas será demonstrado na obtenção de uma tabela paramétrica capaz de calcular  $w_t$  e  $\dot{W}_t$  fazendo-se variar, por exemplo, a pressão do vapor na entrada da turbina.

Monte a tabela paramétrica mostrada na figura abaixo à esquerda e execute-a (tome o cuidado de comentar o valor atribuído a  $P_1$  na “Equations Window”). Os resultados estão mostrados na figura abaixo à direita.

	1	2	3
	$P_1$ [kPa]	$\dot{W}_t$ [kW]	$w_t$ [kJ/kg]
Run 1	8000		
Run 2	9000		
Run 3	10000		
Run 4	11000		
Run 5	12000		
Run 6	13000		
Run 7	14000		
Run 8	15000		
Run 9	16000		
Run 10	17000		

	1	2	3
	$P_1$ [kPa]	$\dot{W}_t$ [kW]	$w_t$ [kJ/kg]
Run 1	8000	75602,87	1332,68
Run 2	9000	76172,00	1342,71
Run 3	10000	76633,11	1350,84
Run 4	11000	77005,99	1357,41
Run 5	12000	77305,22	1362,69
Run 6	13000	77541,93	1366,86
Run 7	14000	77724,74	1370,08
Run 8	15000	77860,49	1372,47
Run 9	16000	77954,73	1374,14
Run 10	17000	78011,97	1375,14

Observe que todas as variáveis de entrada foram mantidas fixas, exceto  $P_1$ . Conforme se observa na tabela paramétrica mostrada acima à direita, o aumento de  $P_1$  causa um aumento em  $\dot{W}_t$  e  $w_t$ .

Salve o arquivo usando o atalho Ctrl+S.

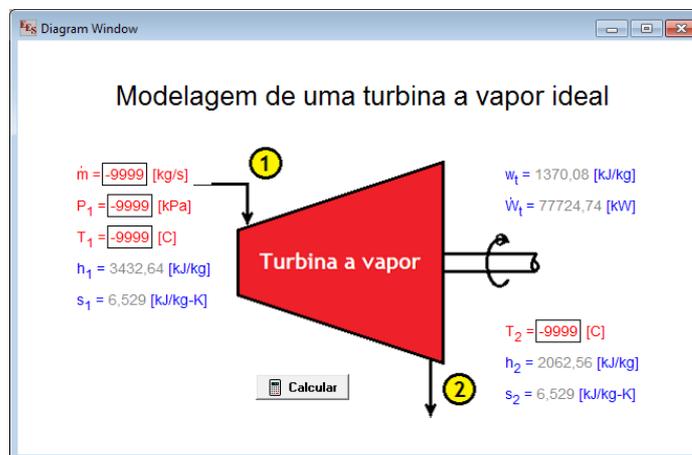
### 8.3.5. Interface Gráfica

Para inserir uma interface gráfica no “Diagram Window”, basta seguir o que foi

descrito na seção 5. Abra a janela de diagrama usando o atalho Ctrl+D e siga os seguintes passos:

- Utilize o botão do teclado “Print Screen” para capturar a Figura 5 deste manual. Cole o conteúdo capturado no Paint e o edite até obter apenas a figura. Selecione toda a figura, copie-a e cole-a no “Diagram Window”.
- Adicione um título para a janela de diagrama, por exemplo “Modelagem de uma turbina a vapor ideal”.
- Adicione  $\dot{m}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  e  $P_1$  como variáveis de entrada, mudando a cor da fonte para vermelho.
- Comente as variáveis  $\dot{m}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  e  $P_1$  na janela de equações.
- Adicione  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $w_t$  e  $\dot{W}_t$  como variáveis de saída, mudando a cor da fonte para azul.
- Adicione um botão de execução e renomeie-o como “Calcular”.

Ao final destas etapas, a janela de diagrama deverá ficar como a mostrada na figura abaixo.



Teste a interface gráfica atribuindo valores quaisquer para as variáveis de entrada  $\dot{m}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  e  $P_1$ , e verifique como mudam os valores das variáveis de saída  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $w_t$  e  $\dot{W}_t$ .

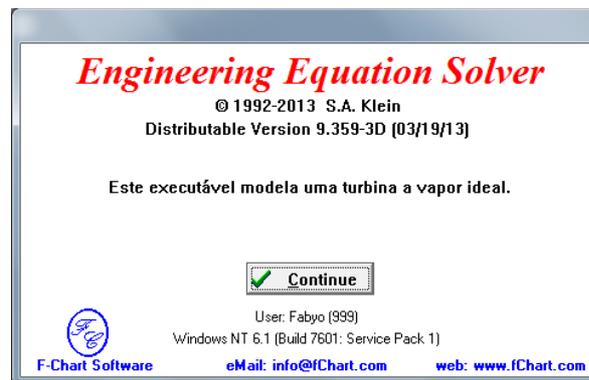
Salve o arquivo usando o atalho Ctrl+S.

### 8.3.6. Arquivo Executável

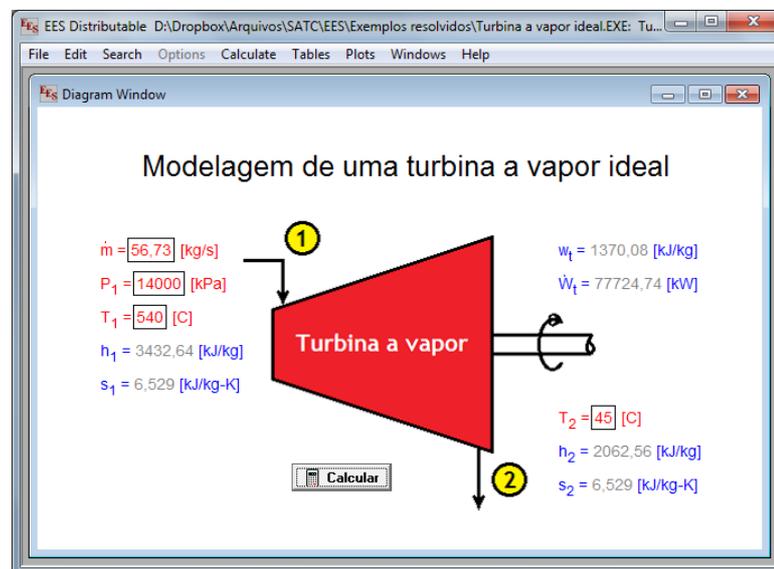
Para obter o arquivo executável deste exemplo, basta seguir o que foi descrito na seção 6. Acesse “File”, e depois “Make Distributable Program”. Na janela de confirmação que abrir, clique em “OK”. Siga os seguintes passos:

- Na aba “Startup”, em “Splash screen message”, digite “Este executável modela uma turbina a vapor ideal”. Observe que no campo “EXE Name”, o nome do arquivo executável a ser compilado será “Turbina a vapor ideal.EXE”.
- Na aba “File Information”, em “Menu text”, digite “Turbina a vapor ideal”.
- Volte à aba “Startup” e clique em “OK”.
- Na janela de alerta que abrir, clique em “OK” e espere até o arquivo ser compilado.

Vá até a pasta onde o arquivo se encontra e execute-o. Primeiro aparecerá a tela de mensagem inicial mostrada abaixo.



Clicando em “Continue”, aparece a tela inicial do executável mostrando a janela de diagrama, conforme mostrado na figura abaixo.





## 9. Exercícios Sugeridos

### 9.1. Conversões

1- Faça as conversões de grandezas listadas abaixo:

- Pressão de 10 bar para as unidades Pa, psi, mmH<sub>2</sub>O, mmHg e torr.
- Velocidade de 40 km/h para as unidades m/s, mph, knot, ft/s e in/s.
- Área de 100.000 yd<sup>2</sup> para as unidades m<sup>2</sup>, hectare, in<sup>2</sup>, ft<sup>2</sup> e acre.
- Energia de 12.000 BTU para as unidades kJ, kWh, kcal, kev e therm.
- Comprimento de 1,5 miles para as unidades km, yd, ft, in e angstrom.
- Potência de 100 hp para as unidades kW, BTU/s, kcal/s, kWh/s e erg/s.

2- Faça as conversões de grandezas das funções descritas abaixo:

- A área superficial terrestre é de  $51,12 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ , e a atmosfera terrestre possui uma massa gasosa de  $5,28 \cdot 10^{12} \text{ kg}$ . Considerando que a aceleração gravitacional é de  $9,81 \text{ m/s}^2$ , determine a pressão atmosférica em mmHg.
- Um automóvel leva 20 minutos para percorrer 25 km. Se a força média de tração aplicada pelos pneus na pista foi de 350 N, determine a potência média gerada pelo automóvel em hp.
- Considere o núcleo do Sol como sendo uma esfera imaginária com raio de 1093 yd no centro dessa estrela. Se a massa do núcleo solar é de  $1,38 \cdot 10^{15} \text{ lb}$ , determine a densidade média do núcleo em  $\text{kg/m}^3$ . Compare a densidade achada com a do alumínio ( $2.700 \text{ kg/m}^3$ ), do aço inox ( $7.850 \text{ kg/m}^3$ ), do chumbo ( $11.340 \text{ kg/m}^3$ ), da platina ( $21.090 \text{ kg/m}^3$ ), e do elemento mais denso conhecido, o ósmio ( $22.610 \text{ kg/m}^3$ ).

### Respostas:

- 1- a)  $P = 10 \text{ bar} = 1.000.000 \text{ Pa} = 145 \text{ psi} = 101.972 \text{ mmH}_2\text{O} = 7.501 \text{ mmHg} = 7.501 \text{ torr}$ .  
 b)  $V = 40 \text{ km/h} = 11,11 \text{ m/s} = 24,85 \text{ mph} = 21,6 \text{ knot} = 36,45 \text{ ft/s} = 437,4 \text{ in/s}$ .  
 c)  $A = 100.000 \text{ yd}^2 = 83.613 \text{ m}^2 = 8,361 \text{ hectare} = 1,296 \cdot 10^8 \text{ in}^2 = 900.000 \text{ ft}^2 = 20,66 \text{ acre}$ .  
 d)  $E = 12.000 \text{ BTU} = 12.661 \text{ kJ} = 3,517 \text{ kWh} = 3.024 \text{ kcal} = 7,903 \cdot 10^{22} \text{ kev} = 0,12 \text{ therm}$ .  
 e)  $L = 1,5 \text{ miles} = 2,414 \text{ km} = 2.640 \text{ yd} = 7.920 \text{ ft} = 95.040 \text{ in} = 2,414 \cdot 10^{13} \text{ angstrom}$ .  
 f)  $\dot{W} = 100 \text{ hp} = 74,57 \text{ kW} = 70,68 \text{ BTU/s} = 17,81 \text{ kcal/s} = 0,02071 \text{ kWh/s} = 7,457 \cdot 10^{11} \text{ erg/s}$ .
- 2- a)  $P = 759,99 \text{ mmHg}$ .

b)  $\dot{W} = 9,78 \text{ hp}$ .

c)  $\rho = 150.100 \text{ kg/m}^3$  (55,6 vezes a do alumínio; 19,1 vezes a do aço inox; 13,2 vezes a do chumbo; 7,1 vezes a da platina; 6,6 vezes a do ósmio).

## 9.2. Termodinâmica

1- Determine o estado termodinâmico e as propriedades termodinâmicas que faltam (T, P, v, u, h, s e x), para as seguintes substâncias:

- a) Água com  $T = 100^\circ\text{C}$  e  $p = 102 \text{ kPa}$ .
- b) Água com  $T = 100^\circ\text{C}$  e  $p = 100 \text{ kPa}$ .
- c) Água com  $T = 100^\circ\text{C}$  e  $p = 101,322 \text{ kPa}$ .
- d) Água com  $T = 100^\circ\text{C}$  e  $v = 1,25 \text{ m}^3/\text{kg}$ .
- e) Dióxido de carbono com  $P = 6500 \text{ kPa}$  e  $h = -233,1 \text{ kJ/kg}$ .
- f) Dióxido de carbono com  $u = -136,8 \text{ kJ/kg}$  e  $s = -1,080 \text{ kJ/kg.K}$ .
- g) Etanol com  $p = 10 \text{ kPa}$  e  $T = 29^\circ\text{C}$ .
- h) Etanol com  $p = 10 \text{ kPa}$  e  $T = 30^\circ\text{C}$ .
- i) R134a com  $v = 0,028 \text{ m}^3/\text{kg}$  e  $h = 102,9 \text{ kJ/kg}$ .
- j) Oxigênio com  $p = 100 \text{ kPa}$  e  $T = -184^\circ\text{C}$ .
- k) Oxigênio com  $p = 100 \text{ kPa}$  e  $T = -183^\circ\text{C}$ .

2- Um vaso com volume de  $0,4 \text{ m}^3$  contém  $2,0 \text{ kg}$  de uma mistura de água líquida e vapor em equilíbrio a uma pressão de  $600 \text{ kPa}$ . Determine:

- a) O volume e a massa do líquido.
- b) O volume e a massa do vapor.

3- Escreva uma rotina computacional no EES para a água saturada em função de uma temperatura qualquer, capaz de determinar as seguintes variáveis:

- Pressão [kPa] e temperatura [ $^\circ\text{C}$ ] críticas.
- Pressão de saturação [kPa].

- Volume específico (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ].
- Massa específica (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].
- Energia interna (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ].
- Entalpia (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ].
- Entropia (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ].

Depois, monte uma tabela paramétrica para a água saturada em função da temperatura, fazendo-a variar de 0 até  $373^\circ\text{C}$ , e capaz de calcular todas as variáveis acima descritas, exceto a pressão e a temperatura críticas. Utilize dois algarismos significativos para a temperatura de saturação, as energias internas e as entalpias, três para a pressão de saturação, as massas específicas e as entropias, e seis para os volumes específicos.

4- Escreva uma rotina computacional no EES para a água saturada em função de uma pressão qualquer, capaz de determinar as seguintes variáveis:

- Pressão [ $\text{kPa}$ ] e temperatura [ $^\circ\text{C}$ ] críticas.
- Temperatura de saturação [ $^\circ\text{C}$ ].
- Volume específico (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ].
- Massa específica (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].
- Energia interna (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ].
- Entalpia (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ].
- Entropia (de líquido saturado, de vapor saturado e de vaporização) [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ].

Depois, monte uma tabela paramétrica para a água saturada em função da pressão, fazendo-a variar de 0,1 até  $22064 \text{ kPa}$ , e capaz de calcular todas as variáveis acima descritas, exceto a pressão e a temperatura críticas. Utilize dois algarismos significativos para a temperatura de saturação, as energias internas e as entalpias, três para a pressão de saturação, as massas específicas e as entropias, e seis para os volumes específicos.

### Respostas:

- 1- a) Líquido comprimido,  $v = 0,001043 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $u = 418,96 \text{ kJ}/\text{kg}$ ,  $h = 419,06 \text{ kJ}/\text{kg}$ ,  $s = 1,307 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ .  
b) Vapor superaquecido,  $v = 1,696 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $u = 2.506,28 \text{ kJ}/\text{kg}$ ,  $h = 2.675,89 \text{ kJ}/\text{kg}$ ,  $s = 7,361 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ .

c) Líquido saturado, ou mistura de líquido e vapor saturados, ou vapor saturado, não há como determinar as propriedades pois o par de propriedades conhecido ( $T$  e  $p$ ) não são independentes na região de saturação.

d) Mistura de líquido e vapor saturados,  $p = 101,322 \text{ kPa}$ ,  $u = 1.977,50 \text{ kJ/kg}$ ,  $h = 2.104,16 \text{ kJ/kg}$ ,  $s = 5,823 \text{ kJ/kg.K}$ ,  $x = 0,7467$ .

e) Líquido comprimido,  $T = 25,01^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,001396 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $u = -242,17 \text{ kJ/kg}$ ,  $h = -233,10 \text{ kJ/kg}$ ,  $s = -1,495 \text{ kJ/kg.K}$ .

f) Líquido comprimido,  $T = 25,07^\circ\text{C}$ ,  $p = 6.407 \text{ kPa}$ ,  $v = 0,004227 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $h = -109,72 \text{ kJ/kg}$ .

g) Líquido comprimido,  $v = 0,001279 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $u = 118,83 \text{ kJ/kg}$ ,  $h = 118,85 \text{ kJ/kg}$ ,  $s = 0,603 \text{ kJ/kg.K}$ .

h) Vapor superaquecido,  $v = 5,441 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $u = 983,40 \text{ kJ/kg}$ ,  $h = 1.037,80 \text{ kJ/kg}$ ,  $s = 3,644 \text{ kJ/kg.K}$ .

i) Mistura de líquido e vapor saturados,  $T = -7,72^\circ\text{C}$ ,  $p = 219,43 \text{ kPa}$ ,  $u = 96,76 \text{ kJ/kg}$ ,  $s = 0,397 \text{ kJ/kg.K}$ ,  $x = 0,3002$ .

j) Líquido comprimido,  $v = 0,0008717 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $u = -406,59 \text{ kJ/kg}$ ,  $h = -406,17 \text{ kJ/kg}$ ,  $s = -3,487 \text{ kJ/kg.K}$ .

k) Vapor superaquecido,  $v = 0,2268 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $u = -214,24 \text{ kJ/kg}$ ,  $h = -191,56 \text{ kJ/kg}$ ,  $s = -1,100 \text{ kJ/kg.K}$ .

2- a)  $V_l = 0,0008 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $m_l = 0,735 \text{ kg}$ .

b)  $V_v = 0,3992 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $m_l = 1,265 \text{ kg}$ .

### 9.3. Transferência de Calor

1- Uma caldeira possui vazão de água de  $5 \text{ kg/s}$ . A água entra na caldeira na condição de líquido comprimido a  $120^\circ\text{C}$   $12 \text{ MPa}$  e sai na condição de vapor superaquecido a  $550^\circ\text{C}$ . Determine o fluxo de calor (potência) transferido para a água na caldeira.

2- Um chuveiro elétrico tem potência de  $7.700 \text{ W}$ . Em um típico dia de inverno a temperatura da água que desce pela tubulação é de  $6^\circ\text{C}$ . Considere que a água possui  $c_p = 4180 \text{ J/kg.K}$ . Pede-se:

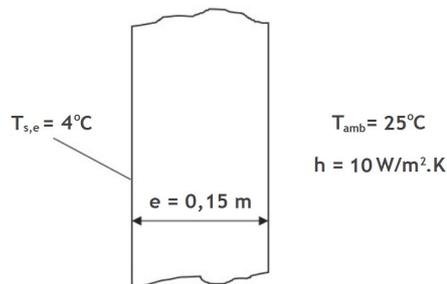
a) Se o registro é aberto até que se obtenha uma vazão volumétrica de água de  $4 \text{ l/min}$ , qual será a temperatura na qual a água sai do chuveiro?

b) Obtenha uma tabela paramétrica que calcule a vazão volumétrica de água quando a temperatura na qual a água sai do chuveiro varia de  $30$  a  $52,5^\circ\text{C}$ .

3- A figura abaixo mostra uma parede plana feita de tijolo comum, com espessura de  $0,2 \text{ m}$ , largura de  $5 \text{ m}$ , altura de  $3 \text{ m}$  e condutividade térmica de  $0,8 \text{ W/m.K}$ , divide o ambiente externo do ambiente interno de uma residência. Considere que durante o inverno a temperatura da superfície externa da parede é de  $10^\circ\text{C}$ , enquanto a temperatura do ambiente

interno da residência é de  $25^{\circ}\text{C}$ . O coeficiente de transferência de calor por convecção no ambiente interno da residência é de  $6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Considere apenas os processos de transferência de calor por condução e convecção. Pede-se:

- Determine o fluxo de calor através da parede, do ambiente interno para o exterior.
- Obtenha uma tabela paramétrica que calcule o fluxo de calor através da parede e a resistência térmica total ao fluxo de calor, quando a espessura da parede varia de 0,1 a 1,0 m.
- Obtenha uma tabela paramétrica que calcule o fluxo de calor através da parede e a resistência térmica total ao fluxo de calor, quando a condutividade térmica da parede varia de  $0,35 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (parede de concreto celular) a  $2,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (parede de concreto de cascalho).
- Considere que as quatro paredes de uma casa quadrada apresentam as dimensões da parede descrita no enunciado do problema. Desprezando a existência de janelas e considerando o teto e o piso como perfeitamente isolados termicamente, obtenha uma tabela paramétrica que calcule o fluxo de calor através da parede, a resistência térmica total ao fluxo de calor e a potência nominal de condicionamento de ar (em BTU/h) necessária para anular a perda de calor pelas paredes, quando a condutividade térmica da parede varia de  $0,35 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (parede de concreto celular) a  $2,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (parede de concreto de cascalho). Considere  $\beta = 3,2$ .



4- Refaça o exercício 3, agora considerando uma condição de verão, onde a temperatura da superfície externa da parede é de  $50^{\circ}\text{C}$ , enquanto a temperatura do ambiente interno da residência é de  $24^{\circ}\text{C}$ .

### Respostas:

- $Q_H = 14.841,25 \text{ kW}$ .
- a)  $T = 33,63^{\circ}\text{C}$ .
- a)  $Q = 1.095,65 \text{ W}$ .
- a)  $Q = 1.356,62 \text{ W}$ .

### 9.4. Geração de Vapor

1- Considerando o mesmo exemplo da turbina a vapor ideal resolvido na seção 8.2:

a) Obtenha uma tabela paramétrica na qual, ao variar a pressão do vapor na entrada da turbina, mostre como varia o título da mistura na saída da turbina ( $x$ ) e as entalpias do vapor na entrada e na saída da turbina.

b) Adicione na interface gráfica a variável de saída  $x$  e observe o que acontece com ela quando a pressão do vapor na entrada da turbina aumenta. Qual a explicação para este comportamento?

2- Considerando o mesmo exemplo da turbina a vapor ideal resolvido no exercício anterior, considere agora que a turbina é real, apresentando um rendimento isentrópico ( $\eta_s$ ) de 85%. Faça as modificações necessárias na rotina computacional, na tabela paramétrica e na interface gráfica, inserindo  $\eta_s$  como variável de entrada, e observe o que acontece com  $x$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $w_{vc}$  e  $\dot{W}_{vc}$  quando as variáveis de entrada  $\dot{m}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $P_1$  e  $\eta_s$  são alteradas. Compare os resultados obtidos com os resultados da turbina ideal do exercício anterior. Observação: O rendimento isentrópico permite determinar a entalpia do vapor na saída da turbina quando a expansão não é isentrópica, e é definido pela equação abaixo (onde  $h_{2s}$  é a entalpia do vapor na saída da turbina quando a expansão é ideal ou isentrópica, e  $h_2$  é a entalpia do vapor na saída da turbina quando a expansão é real):

$$\eta_s = \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{W}_s} = \frac{w_{real}}{w_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (9.1)$$

3- Considere o mesmo exemplo da turbina a vapor real resolvido no exercício anterior, porém inclua na equação da 1ª Lei da Termodinâmica os seguintes termos (que foram desprezados nos dois exercícios anteriores e no exemplo da seção 8.3): o fluxo de calor dissipado pela carcaça da turbina (ou seja, a expansão na turbina deixa de ser adiabática), a variação de energia cinética e a variação de energia potencial. Considere que o fluxo de energia dissipado pela carcaça da turbina ( $Q_{vc}$ ) é de 12,5 kW, as cotas das seções de entrada e saída de vapor na turbina ( $Z_1$  e  $Z_2$ ) são respectivamente 6 e 2 m, as velocidades do vapor na entrada e na saída da turbina ( $V_1$  e  $V_2$ ) são respectivamente 50 e 200 m/s, e a aceleração gravitacional ( $g$ ) é 9,81 m/s<sup>2</sup>. Faça as modificações necessárias na rotina computacional, na tabela paramétrica e na interface gráfica, inserindo  $Q_{vc}$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $V_1$  e  $V_2$  como variáveis de entrada, e observe o que

acontece com  $x$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $w_{vc}$  e  $\dot{W}_{vc}$  quando as variáveis de entrada  $\dot{m}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $P_1$ ,  $\eta_s$ ,  $Q_{vc}$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $V_1$  e  $V_2$  são alteradas. Compare os resultados obtidos com os resultados da turbina ideal do exercício 1 e da turbina real do exercício 2.

4- Considere um condensador no qual o vapor entra com estado termodinâmico igual ao da saída da turbina do exemplo resolvido na seção 8.3, ou seja, a  $45^\circ\text{C}$  e com entropia igual a entropia do vapor na entrada da turbina. O vapor condensa totalmente no condensador e sai deste no estado de líquido saturado à pressão de saturação de  $T = 45^\circ\text{C}$ . Determine a energia específica retirada do vapor pelo condensador ( $q_L$ ) e o fluxo de calor retirado do vapor pelo condensador ( $Q_L$ ).

5- Considere uma bomba na qual água entra com estado termodinâmico igual ao da saída do condensador do exemplo anterior, ou seja, líquido saturado à pressão de saturação de  $T = 45^\circ\text{C}$ . A água é pressurizada pela bomba e sai comprimida com pressão de 14.000 kPa. Determine o trabalho específico consumido pela bomba ( $w_b$ ) e a potência consumida pela bomba ( $\dot{W}_b$ ).

6- Considere uma caldeira na qual água entra com estado termodinâmico igual ao da saída da bomba do exemplo anterior, ou seja, comprimida com pressão de 14.000 kPa. A água vaporiza na caldeira até atingir um estado de vapor superaquecido a  $540^\circ\text{C}$ . Determine a energia específica entregue à água pela caldeira ( $q_H$ ) e o fluxo de calor entregue à água pela caldeira ( $Q_H$ ).

7- Modele um ciclo a vapor ideal unindo as rotinas computacionais do exemplo resolvido na seção 8.3 e dos exercícios 4, 5 e 6. Considere que a vazão mássica de vapor é 56,73 kg/s, a pressão do vapor na entrada da turbina é 14.000 kPa, a temperatura do vapor na entrada da turbina é  $540^\circ\text{C}$ , e a temperatura do vapor na saída da turbina é  $45^\circ\text{C}$ . Determine:

- O trabalho específico gerado ( $w_t$ ) e a potência gerada ( $\dot{W}_t$ ) pela turbina.
- A energia específica retirada do vapor ( $q_L$ ) e o fluxo de calor retirado do vapor ( $Q_L$ ) pelo condensador.
- O trabalho específico consumido ( $w_b$ ) e a potência consumida ( $\dot{W}_b$ ) pela bomba.
- A energia específica entregue à água ( $q_H$ ) e o fluxo de calor entregue à água ( $Q_H$ ) pela

caldeira.

e) O trabalho específico líquido ( $w_{liq}$ ) e a potência líquida ( $\dot{W}_{liq}$ ) e o rendimento térmico ( $\eta_t$ ) do ciclo.

### Respostas:

4-  $q_L = -1.874,14 \text{ kJ/kg}$ ;  $Q_L = -106.319,96 \text{ kW}$ .

5-  $w_b = -14,09 \text{ kJ/kg}$ ;  $\dot{W}_b = -799,19 \text{ kW}$ .

6-  $q_H = 3.230,13 \text{ kJ/kg}$ ;  $Q_H = 183.245,51 \text{ kW}$ .

7- a)  $w_t = 1.370,08 \text{ kJ/kg}$ ;  $\dot{W}_t = 77724,74 \text{ kW}$ .

b)  $q_L = -1.874,14 \text{ kJ/kg}$ ;  $Q_L = -106.319,96 \text{ kW}$ .

c)  $w_b = -14,09 \text{ kJ/kg}$ ;  $\dot{W}_b = -799,19 \text{ kW}$ .

d)  $q_H = 3.230,13 \text{ kJ/kg}$ ;  $Q_H = 183.245,51 \text{ kW}$ .

e)  $w_{liq} = 1.355,99 \text{ kJ/kg}$ ;  $\dot{W}_b = 76.925,54 \text{ kW}$ ,  $\eta_t = 0,4198$ .

## 9.5. Refrigeração e Condicionamento de Ar

1- As propriedades psicrométricas são: temperatura de bulbo seco do ar  $T_{bs}$  [°C], temperatura de bulbo úmido do ar  $T_{bu}$  [°C], temperatura de orvalho do ar  $T_o$  [°C], pressão atmosférica  $p$  [kPa], entalpia do ar  $h$  [kJ/kg], volume específico do ar  $v$  [m<sup>3</sup>/kg], teor de umidade do ar  $\omega$  [g H<sub>2</sub>O/kg Ar] e umidade relativa do ar  $\phi$  [%]. Faça uma rotina computacional que calcule as demais propriedades psicrométricas, conhecidas as seguintes propriedades:

a)  $T_{bs} = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_o = 18^\circ\text{C}$  e  $p = 101,325 \text{ kPa}$ . Obtenha também uma tabela paramétrica que, mantendo  $T_{bs}$  e  $T_o$  constantes, calcule a variação das demais propriedades psicrométricas quando se varia a pressão.

b)  $T_{bs} = 18^\circ\text{C}$ ,  $T_{bu} = 13^\circ\text{C}$  e  $p = 95 \text{ kPa}$ . Obtenha também uma tabela paramétrica que, mantendo  $T_{bs}$  e  $T_{bu}$  constantes, calcule a variação das demais propriedades psicrométricas quando se varia a pressão.

c)  $h = 33 \text{ kJ/kg}$ ,  $\phi = 22\%$  e  $p = 105 \text{ kPa}$ . Obtenha também uma tabela paramétrica que, mantendo  $h$  e  $\phi$  constantes, calcule a variação das demais propriedades psicrométricas quando se varia a pressão.

2- Uma torre de resfriamento é um equipamento no qual ar resfria água previamente borrifada. Se 15 m<sup>3</sup>/s de ar com  $T_{bs} = 35^\circ\text{C}$  e  $T_{bu} = 24^\circ\text{C}$ , a uma pressão atmosférica de 101 kPa, adentram uma torre, deixando-o saturado a 31°C, pede-se:

a) Até que temperatura essa corrente de ar pode resfriar água borrifada a 38°C e com vazão de 20 kg/s?

b) Quantos kg/s de água devem ser fornecidos para compensar a água que se evapora?

3- Uma vazão de 3,5 m<sup>3</sup>/s de ar com  $T_{bs} = 27^\circ\text{C}$  e  $\phi = 50\%$ , à pressão atmosférica padrão de 101,325 kPa, adentram uma unidade de condicionamento de ar. O ar deixa essa unidade com  $T_{bs} = 13^\circ\text{C}$  e  $\phi = 90\%$ . Determine:

a) A capacidade de refrigeração em kW.

b) A taxa de remoção de água do ar.

c) Obtenha uma tabela paramétrica que calcule a capacidade de refrigeração e a taxa de remoção de água do ar quando a umidade relativa do ar que adentra o condicionador varia de 10 a 100%. Por que alguns valores calculados são negativos?

4- Um ciclo padrão de compressão de vapor opera com refrigerante 22. A evaporação do refrigerante ocorre a  $-5^\circ\text{C}$  e a condensação a  $30^\circ\text{C}$ . Calcule:

a) O efeito de refrigeração, o trabalho específico de compressão, o calor rejeitado no condensador e o coeficiente de eficácia.

b) Obtenha uma tabela paramétrica que calcule o efeito de refrigeração, o trabalho específico de compressão, o calor rejeitado no condensador e o coeficiente de eficácia quando a temperatura de evaporação varia de  $-10$  a  $-1^\circ\text{C}$ . O que ocorre com o coeficiente de eficácia quando a temperatura de evaporação sobe?

c) Obtenha uma tabela paramétrica que calcule o efeito de refrigeração, o trabalho específico de compressão, o calor rejeitado no condensador e o coeficiente de eficácia quando a temperatura de condensação varia de  $25$  a  $34^\circ\text{C}$ . O que ocorre com o coeficiente de eficácia quando a temperatura de condensação sobe?

### Respostas:

1- a)  $T_{bu} = 21,75^\circ\text{C}$ ,  $h = 63,27 \text{ kJ/kg}$ ,  $v = 0,877 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $\omega = 12,94 \text{ g H}_2\text{O/kg Ar}$ ,  $\phi = 48,62\%$ .

b)  $T_o = 9,54^\circ\text{C}$ ,  $h = 38,13 \text{ kJ/kg}$ ,  $v = 0,891 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $\omega = 7,90 \text{ g H}_2\text{O/kg Ar}$ ,  $\phi = 57,69\%$ .

c)  $T_{bs} = 23,30^\circ\text{C}$ ,  $T_{bu} = 12,04^\circ\text{C}$ ,  $T_o = 0,41^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,815 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $\omega = 3,75 \text{ g H}_2\text{O/kg Ar}$ .

2- a)  $T_{w2} = 31,3^\circ\text{C}$ .

b)  $\dot{m}_{rep} = 0,246 \text{ kg/s}$ .

3- a)  $Q_L = 86,34 \text{ kW}$ .

b)  $\dot{m}_{rem} = 0,0112 \text{ kg/s}$ .

4- a)  $w_c = -25,74 \text{ kJ/kg}$ ,  $q_H = -192,28 \text{ kJ/kg}$ ,  $q_L = 166,54 \text{ kJ/kg}$ ,  $\beta = 6,47$