



ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS UTILIZANDO SOFTWARES ACADÊMICOS

Ellen M. P. de Almeida – ellenmayara.stm@gmail.com
Universidade Federal do Oeste do Pará
Rua Vera Paz, s/n.
68035-110 – Santarém – Pará

Janna K. A. da Silva – janna_karina@hotmail.com
Universidade Federal do Oeste do Pará
Rua Vera Paz, s/n.
68035-110 – Santarém – Pará

Carlos C. S. da Cruz – ccelioscruz@yahoo.com.br
Universidade Federal do Oeste do Pará
Rua Vera Paz, s/n.
68035-110 – Santarém – Pará

Resumo: *A utilização de ferramentas computacionais nas disciplinas de engenharia tem ganhado destaque, haja vista a complexidade da aprendizagem discente em disciplinas que envolvem amplo conhecimento matemático, projetos de sistemas e equipamentos de diversas dimensões. Na termodinâmica, por exemplo, os sistemas térmicos que envolvem geração de energia e refrigeração devem ser cuidadosamente analisados para que haja o equilíbrio entre as teorias e experimentações práticas, contribuindo para o entendimento da disciplina. Assim, buscou-se apresentar o uso dos softwares Engineering Equation Solver (EES) e Computer Aided Thermodynamics Tables (CATT) na análise e simulação dos ciclos de Rankine e de refrigeração por absorção, identificando a contribuição que essas ferramentas possam exercer na compreensão de problemas de sistemas térmicos de forma a abranger ainda a configuração ideal desses sistemas. O objetivo é, portanto, discutir meios que auxiliem no entendimento desses sistemas e que possa disseminar um conhecimento mais eficiente através da simulação com o uso de softwares acadêmicos. Desse modo, pode-se avaliar a forma como a utilização destes softwares contribui para o ensino-aprendizagem dos discentes no âmbito acadêmico e profissional.*

Palavras-chave: *Softwares acadêmicos, EES, Sistemas térmicos, Ciclo de Rankine, Refrigeração por absorção.*

1. INTRODUÇÃO

O uso de *softwares* computacionais em disciplinas de engenharia sempre teve grande destaque na formação discente, principalmente em projetos que envolvam modelagem matemática, uma vez que proporciona a viabilidade de identificação da melhor maneira de obter um resultado coerente de acordo com o que se quer abordar. Dentre as principais contribuições dessas ferramentas destacam-se: abordagem facilitada de conceitos científicos;

Organização



Promoção





pré – determinação de fórmulas matemáticas usuais; facilidade no dimensionamento de projetos com simulações computacionais e redução de gastos com utilização de protótipos.

Um exemplo de *software* aplicável em disciplinas da engenharia é o *Engineering Equation Solver* (EES). Desenvolvido pela empresa *F-Chart*, o *software* apresenta uma linguagem simplificada e intuitiva na resolução de problemas de menor complexidade e pode ser utilizado em disciplinas que envolvam conceitos de termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. A simulação no EES possibilita ao usuário uma avaliação coerente para a obtenção de um resultado, permitindo uma visualização ampla sobre características de operação dos equipamentos, rendimento e eventual melhoramento dos sistemas simulados.

Outra ferramenta de potencial aplicabilidade na termodinâmica é o *Computer Aided Thermodynamics Tables* (CATT), utilizado em análises de sistemas que envolvem propriedades tabeladas. Este *software* auxilia a consulta destas de forma ágil e precisa utilizando duas propriedades conhecidas para determinação de outras sem a necessidade de interpolação em tabelas.

Embora os trabalhos sobre sistemas térmicos sejam correlacionados a otimização destes, a prática de simulação apresenta-se como alternativa interessante para estimular a análise e o melhoramento da eficiência dos ciclos termodinâmicos estudados, dentre os quais temos: o ciclo de Rankine e ciclo de refrigeração por absorção.

O ciclo de Rankine ideal será abordado analiticamente com auxílio do CATT com o intuito de comparar os resultados com a simulação realizada no EES. O ciclo de absorção será usado para abordar outras funcionalidades do *software* EES, possibilitando um entendimento mais completo sobre a estrutura dos sistemas e o fluxo das substâncias binárias.

2. UTILIZAÇÃO DE SOFTWARES NA TERMODINÂMICA

2.1. O *software* EES

O *software Engineering Equation Solver* é muito útil na resolução de problemas que envolvem sistemas térmicos. Desenvolvido para as versões do *Windows* e utilizado no sistema *Linux* com o auxílio de emuladores, o programa permite que o aluno avalie de forma mais adequada e econômica o comportamento de problemas e suas variáveis, contribuindo no aprendizado de conceitos importantes na engenharia. Para isso o EES apresenta vários exemplos em sua rotina computacional que podem ser utilizados e modificados pelo usuário. Para Ceranto et al.(2012) uma das facilidades do EES é que este não requer linguagem especial de programação, permitindo uma simplificada manipulação de suas funcionalidades pelo usuário.

O programa foi desenvolvido pela *F-Chart Software*, com a finalidade de resolver equações algébricas, diferenciais e com variáveis complexas. De modo simplificado, Pereira (2013) cita as principais funcionalidades do EES, têm-se, portanto: otimizações, análise de regressões lineares e não lineares, plotagem de gráficos, simplificação de análise de incertezas e animações.

O uso deste *software* em sistemas térmicos mostra-se de grande utilidade, pois diminui a necessidade de consultas em tabelas termodinâmicas e domínio de técnicas de solução de equações.

2.2. O *software* CATT

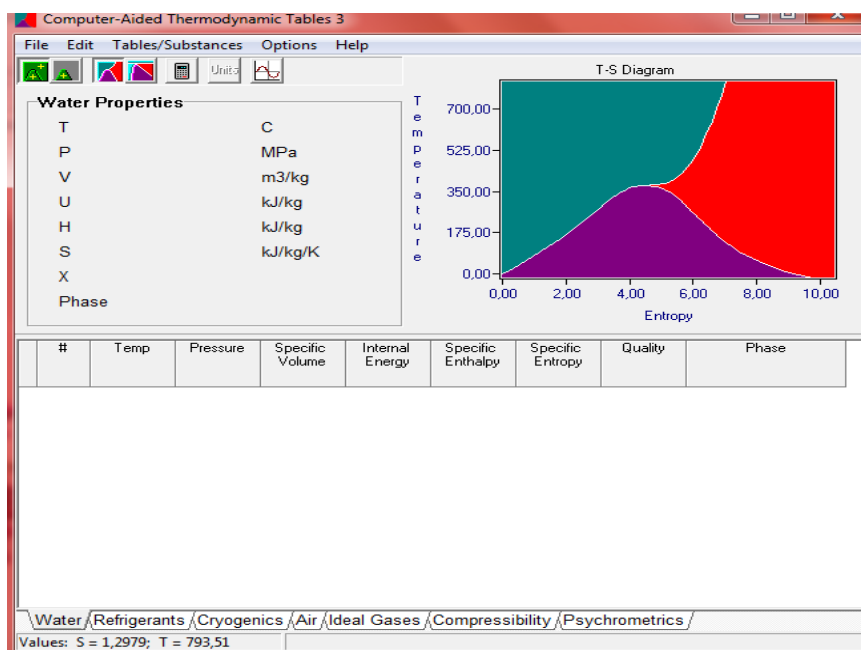
O *software Computer Aided Thermodynamic Tables* (CATT) é um programa executável de fácil manipulação contendo as propriedades termodinâmicas de diversas substâncias,



usualmente encontradas em livros. Com o auxílio deste *software* torna-se possível consultar tais propriedades sem a necessidade de interpolação de valores contidos em tabelas.

A Figura 1 indica a interface do *software*. A tela inicial possui uma seção superior e inferior, separadas por uma barra ajustável, que permite maior ou menor visualização de cada seção. A seção superior indica os valores observados no último acesso e uma representação gráfica destes enquanto a seção inferior destaca todos os valores analisados anteriormente similarmente a uma planilha.

Figura 1 - Tela inicial do *software* CATT.



Fonte: CATT (2017)

As propriedades são organizadas em sete grupos: “*Water*”, “*Refrigerants*”, “*Cryogenics*”, “*Air*”, “*Ideal Gases*”, “*Compressibility*” e “*Psychrometrics*”. Para acessar um grupo pode-se selecioná-lo na parte inferior da tela ou clicando no menu “*Tables/Substances*”.

O CATT apresenta modos de cálculo de propriedades gerais e propriedades de saturação para os grupos “*Water*”, “*Refrigerants*” e “*Cryogenics*”. No primeiro modo, devem-se inserir duas propriedades para a determinação das outras e estes valores encontrados podem estar em qualquer região termodinâmica. No modo de propriedades de saturação inicialmente acrescenta-se uma pressão ou uma temperatura e em seguida uma mistura a partir do título, entalpia, entropia ou volume específico para os demais valores serem calculados. Os dados obtidos referem-se apenas à região saturada da substância. Após escolher um modo de cálculo, utiliza-se o ícone “*Calculate*” na tela inicial para a realização dos cálculos requeridos.

3. SISTEMAS TÉRMICOS

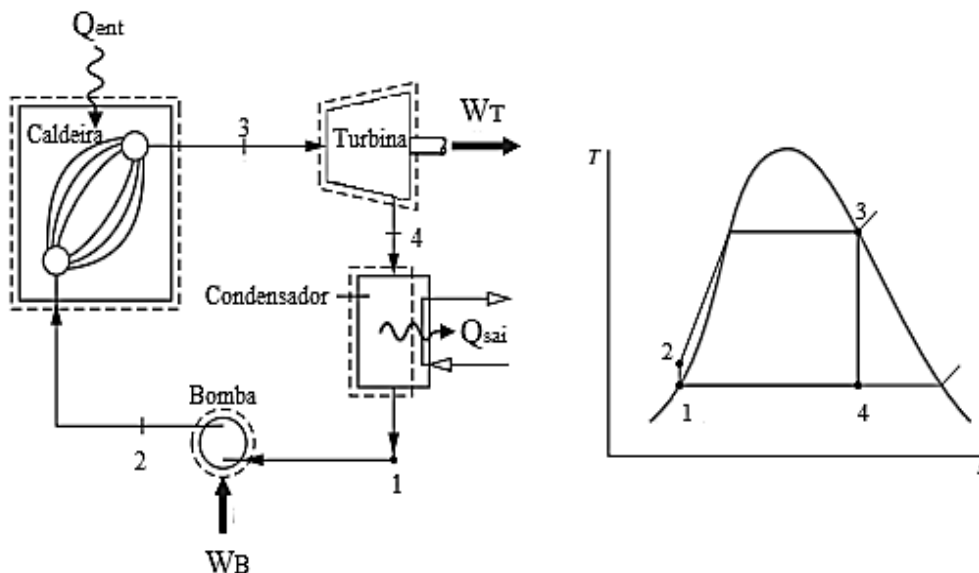
3.1. O ciclo de Rankine

O ciclo ideal de Rankine é constituído basicamente por uma turbina, um condensador, uma caldeira e uma bomba e seu fluido de trabalho geralmente é a água. O ciclo ideal não



possui irreversibilidade interna e transferência de calor para vizinhança. A Figura 2 mostra um ciclo de Rankine simples e seu respectivo diagrama T-s.

Figura 2 - Ciclo de Rankine simples e seu diagrama T-s.



Fonte: Adaptado de Shapiro (2013).

No estado 1, líquido saturado entra na bomba, onde é comprimido isentropicamente para aumentar a pressão. A água em forma de líquido comprimido no estado 2 segue para a caldeira, aquecida isobaricamente até a saturação, evaporando-se. Vapor superaquecido deixa a caldeira no estado 3 e entra na turbina, expandindo-se de maneira isentrópica, produzindo trabalho. Ao sair da turbina, a água usualmente está em uma mistura bifásica no estado 4, a qual é condensada à pressão constante no condensador, finalizando o ciclo.

Os princípios de conservação de massa e de conservação de energia são aplicados a cada componente do ciclo para a determinação das expressões de calor e trabalho do sistema. A eficiência térmica do ciclo é dada pela relação entre trabalho líquido produzido pelo ciclo e a quantidade de calor fornecida à caldeira. Logo,

$$\eta = \frac{w_{liq}}{q_{ent}} \quad (1)$$

onde:

w_{liq} - Trabalho líquido produzido pelo ciclo [kJ/kg]

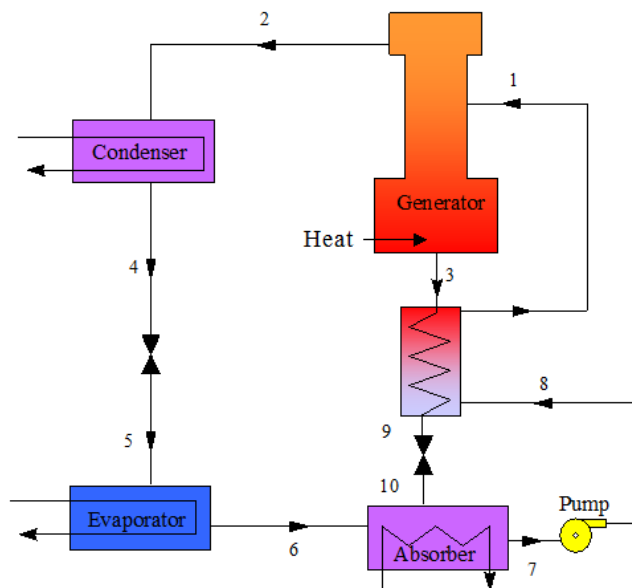
q_{ent} - Quantidade de calor na caldeira [kJ/kg]

3.2 Sistema de Refrigeração por absorção

O ciclo de refrigeração por absorção, ilustrado na Figura 3, é um dos sistemas simulados no EES. O *software* apresenta combinações de substâncias e suas propriedades que podem ser utilizadas pelos sistemas de refrigeração por absorção (SRA), facilitando o balanço de massa e energia, bem como os cálculos do Coeficiente de Performance (COP) do sistema, que trata da eficiência do SRA.



Figura 3 - Esquema de um sistema de refrigeração por absorção



Fonte: EES (2017)

Este ciclo pressupõe cinco componentes principais os quais recebem auxílio de outros dispositivos para o seu funcionamento. Os dispositivos citados são: gerador, evaporador, condensador, absorvedor e dispositivos de expansão.

É oportuno compreender que o ciclo opera com dois níveis de pressão, os quais são estabelecidos pelas temperaturas de evaporação e condensação. Analisando as características da solução, temos que no gerador é adicionado calor de uma fonte a alta temperatura, esse calor faz com que parte da amônia se vaporize e se separe da solução como podemos observar no ponto um do sistema.

O vapor de amônia superaquecido - ponto dois do sistema - segue para o condensador onde o calor de condensação é removido do ciclo, por meio de água ou ar que o resfria a uma alta pressão, fazendo com que o refrigerante retorne para a fase líquida à temperatura de condensação. A amônia líquida, à alta pressão, passa por uma válvula de expansão – ponto quatro do sistema - onde ocorre uma brusca queda de pressão.

É nesse momento que temos o fenômeno denominado expansão, que diminui a temperatura da amônia que segue então para o evaporador conforme o ponto cinco do sistema. No evaporador, a amônia líquida, a uma baixa pressão e a uma baixa temperatura, retira calor do meio que se deseja resfriar, retornando novamente para a fase de vapor à temperatura de evaporação.

Após a separação das substâncias no gerador, no início do ciclo, a solução torna-se uma solução fraca ou pobre em refrigerante (amônia) – ponto três do sistema. Essa solução pobre, a uma alta temperatura e a uma alta pressão, passa pelo trocador de calor e válvula de expansão - ponto nove - seguindo para o absorvedor - ponto dez do sistema. No absorvedor, a solução absorve vapor de amônia oriundo do evaporador – ponto seis do sistema.

Trata-se, portanto, de um processo de absorção exotérmico onde o calor de absorção precisa ser removido do ciclo para que o processo não sofra interrupção, mantendo constante a temperatura de absorção.

Para calcular a eficiência térmica de um SRA utiliza-se o Coeficiente De Performance (COP) que pode ser expresso por:

Organização

Promoção



$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_{\text{ge}} + W_b} \quad (2)$$

Onde:

Q_{evap} - Fluxo de calor no evaporador [kJ/s]

Q_{ge} - Fluxo de calor no gerador [kJ/s]

W_b - Fluxo de trabalho na bomba [kJ/s]

4. MODELAGEM DOS SISTEMAS TÉRMICOS

A modelagem dos sistemas foi realizada de forma a demonstrar a eficácia da simulação do *software* EES por meio de comparação com a resolução analítica do ciclo de Rankine - auxiliada pelo *software* CATT - e balanços de massa e energia no ciclo de refrigeração por absorção.

O princípio da conservação de massa estabelece a relação do fluxo de massa que entra e do fluxo de massa que sai do volume de controle durante o intervalo de tempo Δt . Para um processo em regime permanente aplicado a um volume de controle em regime permanente, com várias entradas e saídas é expresso por:

$$\sum_{ent} \dot{m}_{ent} = \sum_{sai} \dot{m}_{sai} \quad (3)$$

A lei de conservação de energia afirma que a energia não pode ser criada, apenas transformada. Em termos matemáticos devem-se considerar as formas de energia existentes para o equacionamento da primeira lei da termodinâmica, assim têm-se: calor, trabalho e dependendo do sistema estudado, deve-se considerar a energia das moléculas que pode ser dividida em energia interna, potencial e cinética. Considerando ainda a entalpia do sistema, temos a primeira lei da termodinâmica:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{ent} \dot{m}_{ent} \left(h_{ent} + \frac{V^2}{2} + gz_{ent} \right) - \sum_{sai} \dot{m}_{sai} \left(h_{sai} + \frac{V^2}{2} + gz_{sai} \right) \quad (4)$$

Onde:

\dot{Q} Fluxo de calor [kJ/s]

\dot{W} Fluxo de trabalho [kJ/s]

\dot{m} Fluxo de massa que entra no sistema [kg/s]

h Entalpia que entra no sistema [kJ/kg]

$\frac{V^2}{2}$ Energia cinética por unidade de massa [kJ/kg]



gz Energia potencial por unidade de massa [kJ/kg]

Geralmente, em sistemas térmicos não há variação de velocidade significativa entre a entrada e a saída do volume de controle, bem como não há grandes alterações de altura nestes, sendo, portanto, desconsiderados nas análises termodinâmicas.

Deste modo, as equações de balanços de massa e energia foram aplicadas em cada componente dos sistemas térmicos analisados, tanto para análise analítica e simulação do ciclo de Rankine quanto para a simulação do sistema de refrigeração por absorção.

5. SIMULAÇÃO DOS SISTEMAS TÉRMICOS

A simulação através do *software* EES para o ciclo de Rankine deu-se pela implementação das equações de balanço de massa e energia, bem como a determinação das propriedades em cada estado do ciclo na janela denominada *Equation Window*. Após verificar se o número de equações é o mesmo de variáveis, utiliza-se o botão *Solve* para resolução do código. A *Solution Window* é gerada após a execução do código e apresenta os resultados obtidos, possíveis erros relacionados às unidades e sugere unidades para variáveis não mensuradas no código.

A simulação do ciclo de refrigeração por absorção se desenvolveu através do menu *Examples* do EES, submenu *Procedures and Functions*, que abre a janela *Select file*, onde há um modelo de ciclo de absorção utilizando amônia como refrigerante e água como absorvente. Esta ferramenta mostra na *Equation Window* o código do modelo, salvo na rotina do EES. Utilizando o botão *Solve* chegamos à janela *Solution Window* que mostra todos os cálculos do sistema incluindo o Coeficiente de Performance (COP), propriedades termodinâmicas, fluxos de calor e fluxos de massa. O código pode ainda ser modificado a fim de se obter um melhor desempenho do ciclo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerou-se um ciclo de Rankine ideal, onde vapor a 8 MPa e 480 °C se expande na turbina, saindo a pressão do condensador de 8 kPa. Determinou-se a eficiência térmica deste ciclo através da Equação (1).

As propriedades termodinâmicas da água para o ciclo de Rankine foram adquiridas de duas maneiras: para a análise analítica, o *software* CATT forneceu tais propriedades e para a simulação, o EES ofereceu bibliotecas abrangendo-as. A Tabela 1 indica os resultados adquiridos.

Tabela 1 – Resultados obtidos para as propriedades termodinâmicas do ciclo de Rankine.

Estados	Analítico		Numérico	
	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg*K]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg*K]
1	173,9	0,5925	173,9	0,5925
2	181,9	0,5925	181,9	0,5925
3	3348	6,658	3349	6,659
4	2083	6,658	2083	6,659

Fonte: Próprios autores

Para o cálculo da eficiência térmica encontrou-se os fluxos de trabalho das turbinas e bombas, bem como o fluxo de calor transferido na caldeira, na modelagem e simulação, que estão distribuídos na Tabela 2.

Organização



Promoção





Tabela 2 - Resultados obtidos pela modelagem e simulação do ciclo de Rankine.

	\dot{w}_T (kJ/kg)	\dot{w}_B (kJ/kg)	\dot{q}_{ent} (kJ/kg)	η (%)
Analítico	1265	8	3166	39,70
Numérico	1266	8,046	3167	39,72

Fonte: Próprios autores.

Analisando os resultados obtidos para as propriedades termodinâmicas, vazão mássica fluxos de trabalho e calor e eficiência térmica, analiticamente e através do EES, percebe-se que são valores próximos, evidenciando a eficácia da aplicabilidade do *software* na simulação de sistemas de potência a vapor.

A Figura 4 mostra os dados de saída do exemplo do sistema de refrigeração por absorção da rotina do EES. O sistema utiliza água amônia como par de substâncias, com P_{high} igual a 13,5 [bar] e P_{low} igual a 1,7 [bar].

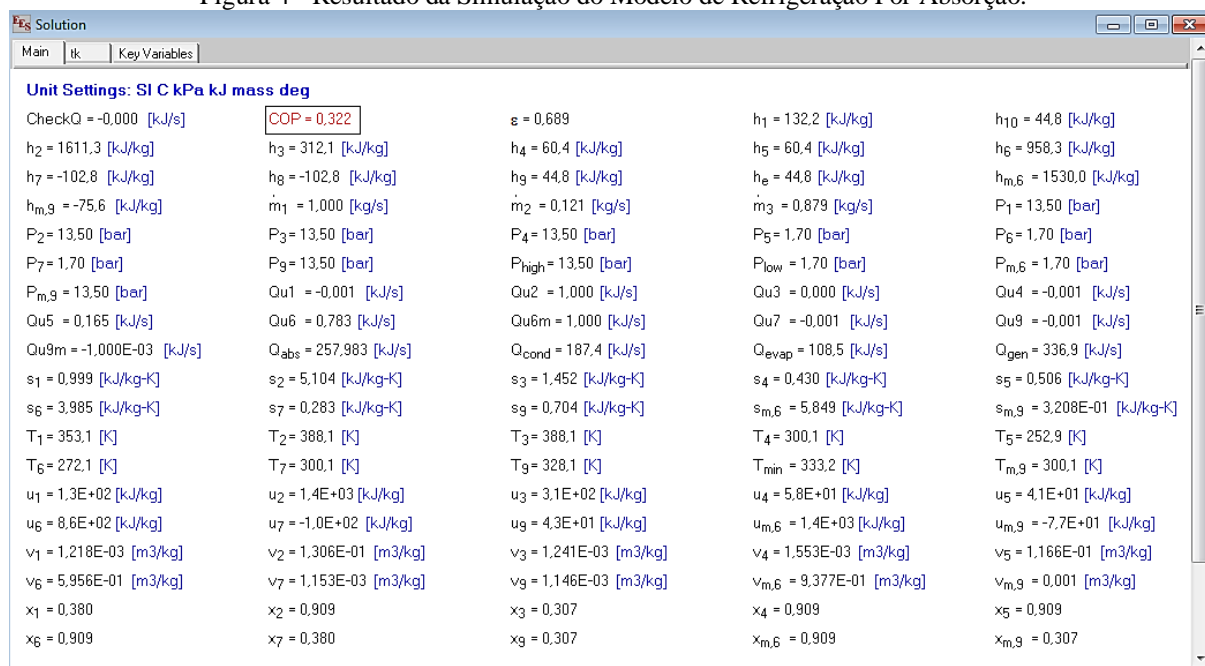
Observa-se, que T_2 aumenta com a introdução do calor no ponto 1, vaporizando a água da solução: $T_1= 353,1$ [K] e $T_2= 388,10$ [K], a solução torna-se vapor superaquecido com a concentração de amônia em 0,909. Após, a solução retorna para a fase líquida à temperatura de condensação com T_4 igual a 300,1 [K] devido a retirada do calor de condensação para o meio externo.

Após passar pela válvula no estado 5 temos P_5 igual a 1,7 [bar] devido a evaporação de uma parcela de água com $T_5=252,9$ [K].

Ainda no início do ciclo, parte da solução é direcionada ao trocador de calor evidenciando a concentração x_3 baixa com 0,307 de amônia, com temperatura e pressão altas: $T_3= 388,1$ [K]. e $P_3=13,5$ [bar]. Após passar pela válvula a solução absorve vapor de água do evaporador. Considerando o fluxo de calor no evaporador de 108,5 [kJ/s], fluxo de calor no gerador de 336,9 [kJ/s] e o trabalho na bomba desprezível, temos o COP de 0,322.



Figura 4 - Resultado da Simulação do Modelo de Refrigeração Por Absorção.



Fonte: EES (2017)

7. CONCLUSÃO

O estudo através da simulação dos ciclos de Rankine e de refrigeração por absorção demonstrou o efetivo funcionamento do *software* EES, contribuindo de forma ágil e econômica para a análise de sistemas estudados.

O *software* CATT, foi utilizado como auxílio na obtenção analítica do ciclo de Rankine, onde se calculou as entalpias e entropias em cada componente do ciclo e evidenciou resultados satisfatórios com relação à simulação do EES.

A eficiência térmica do ciclo de Rankine simples está na faixa de 39 por cento, isto é, há um aproveitamento de 39% do calor fornecido na caldeira em trabalho líquido produzido. O rendimento do ciclo pode ser melhorado com alteração da configuração do sistema, como o ciclo com Reaquecimento ou com Regeneração. Tais configurações devem ser analisadas de forma a assimilar os aspectos econômicos, visto que o aumento do capital investido pelo acréscimo de componentes no sistema deve ser justificado pelo aumento de sua eficiência. (SHAPIRO, 2013)

No caso do ciclo de refrigeração por absorção, observou-se facilidade de manipulação na linguagem programável dos exemplos contidos na biblioteca do mesmo. O Coeficiente de Performance foi de 0,322. Para Cantarutti (2011, apud GORDON E NG, 2000) o Coeficiente de Performance do ciclo de absorção é relativamente menor que o ciclo de compressão a vapor devido à entropia no momento de conversão da energia térmica, a qual não implica quando da utilização da energia elétrica.

As ferramentas utilizadas, realmente auxiliam na compreensão dos problemas estudados, e podem contribuir no processo de ensino-aprendizagem nas disciplinas de engenharia, inclusive apresentam-se com potencial aplicabilidade para a produção científica nas universidades e em seus eventos acadêmicos.

Assim, a utilização dos *softwares* para a simulação de sistemas térmicos mostrou-se de forma útil para a contribuição do aprendizado dos discentes, uma vez que possibilita a ampliação das aplicações de problemas de engenharia através das simulações pelos *softwares*



apresentados, possibilitando a compreensão de forma prática e eficiente o funcionamento dos sistemas estudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANTARUTTI, B. R. Análise Teórico-Experimental de um Sistema de Refrigeração por Absorção de Simple Efeito Utilizando H₂O-LiBr. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2011.

CERANTO, F. A. A. et al. Modelando Sistemas Térmicos com o Engineering Equation Solver (EES): Facilidade De Programação e Obtenção de Resultados. In: XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. São Carlos – SP, 2012.

DAMASCENO, M. A. S. S.; TORRES, E.A. Simulação Computacional para um Sistema de Refrigeração por Compressão. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande – Paraíba, 2010.

PEREIRA, F. L. Manual Básico do Software EES – Engineering Equation Solver (Versão 1.0). Faculdade SATC, Departamento de Engenharia Mecânica. Criciúma – SC, 2013.

SHAPIRO, H. N.; MORAN, M. J. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. Tradução e revisão de Gisele Maria Ribeiro. Rio de Janeiro, 2012.

ANALYSIS AND SIMULATION OF THERMAL SYSTEMS USING ACADEMIC SOFTWARE

Abstract: *The use of computational tools in engineering disciplines has gained prominence given the complexity of student learning in disciplines involving extensive mathematical knowledge, systems projects and equipment of various dimensions. In thermodynamics, for example, the thermal systems that involve the generation of energy and the cooling are provided by means of systems of accounting and distribution of electric energy. Thus, we sought to present the use of Engineering Equation Solver (EES) and Computer-aided Thermodynamics Tables (CATT) in the analysis and simulation of Rankine cycles and absorption refrigeration, identifying a contribution that these tools is a company in Problem-solving area of thermal systems of a form still encompasses an ideal systems configuration. The objective is, therefore, to discuss means that help not to understand design systems and that can disseminate a more efficient knowledge through the simulation with the use of academic software. Thus, one can evaluate how a use of these software contributes to the teaching-learning of discourses in the academic and professional field.*

Key-words: *Academic Software, EES, Thermal Systems, Rankine Cycle, Absorption Cooling*