

CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA E SIMULAÇÃO DE CICLOS DE POTÊNCIA A VAPOR - RANKINE

N.V. FREIRE¹, nian@alunos.eel.usp.br
P.F. ARCE-CASTILLO¹, parce@usp.br

¹ Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Departamento de Engenharia Química

Resumo: Os fluidos são usados nas indústrias e usinas para diversas finalidades, principalmente na geração de trabalho (que depois é convertida em energia elétrica). Para tal, as propriedades termodinâmicas do fluido, tais como entalpia, entropia e volume específico, devem ser conhecidas, bem como os parâmetros termodinâmicos dos ciclos de potência (calor requerido, trabalho gerado, eficiência do ciclo), visando o projeto dos equipamentos. Dessa forma, este artigo visa o uso de sub-rotinas computacionais implementadas no software MatLab para correlacionar as propriedades termodinâmicas da água sob diferentes condições de temperatura e pressão, que são utilizadas na simulação de diversos tipos de ciclos de potência a vapor de Rankine que utilizam água como fluido de trabalho. Assim o programa prevê os valores de calor requerido no processo e trabalho gerado. O programa mostrou bons resultados, com erros relativos por volta de 1% nas condições termodinâmicas mais usuais de trabalho.

Palavras-chave: Água, propriedades termodinâmicas, ciclo de Rankine, MATLAB

CORRELATIONS OF THERMODYNAMIC PROPERTIES OF WATER AND SIMULATION OF STEAM POWER CYCLES – RANKINE

Abstract: Fluids are used in industries and power plants for many purposes mainly in the shift work which will be transformed in electrical energy. To do these, thermodynamic properties of fluids, such as enthalpy, entropy and specific volume should be known as well as the thermodynamic parameters of power cycles (required heat, generated work, cycle's efficiency), aiming the design of the equipments. Therefore, this work aims the use of computational subroutines written in MatLab software to correlate the thermodynamic properties of water at different temperature and pressure conditions which are used in simulation of many types of Rankine steam power cycle, obtaining thus the values of required heat in the process and the generated work.

Keywords: Water, thermodynamic properties, Rankine cycle, MATLAB.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, há diversas maneiras eficientes de se obter trabalho mecânico, que pode ser utilizado para produzir energia elétrica. Dentre estas maneiras, há os ciclos de potência a vapor, que são amplamente utilizados no mundo inteiro, principalmente em termoelétricas. Nestes processos, um fluido de trabalho é vaporizado, expandido, condensado e comprimido continuamente em diversas etapas. Devido à disponibilidade, baixo custo e versatilidade, a água é o fluido de trabalho mais utilizado, além de possuir ótimas propriedades termodinâmicas específicas, como uma alta entalpia de vaporização.

Nos ciclos de potência a vapor, o fluido de trabalho é captado e aquecido pelo calor fornecido por uma caldeira. Assim, o fluido, inicialmente líquido comprimido, passará para o estado de vapor (geralmente superaquecido), que possui altos valores de entalpia e entropia, e que irá movimentar uma ou mais turbinas geradoras de trabalho mecânico. Dessa forma, a água, como fluido de trabalho, é submetida a altos valores de pressão e temperatura. Quanto maiores estes valores, maior será a eficiência do ciclo. Entretanto, em condições severas, suas propriedades

termodinâmicas se tornam de difícil análise, o que acontece quando ela se aproxima do ponto crítico (220,9 bar e 374,1 °C). Quando as condições do sistema se aproximam desta faixa, os erros de análise nos valores das propriedades termodinâmicas tornam-se maiores, o que pode influenciar nos cálculos dos processos industriais e comprometê-los (Wallas, 1990).

As temperaturas e pressões que podem ser atingidas pelo vapor são limitadas pelas características dos materiais que constituem os equipamentos utilizados no processo. Atualmente, é possível chegar a pressões de 300,0 bar e temperaturas de 620°C, além de poder trabalhar, no caso da água, na região de fluido supercrítico. Dentre os vários ciclos de potência a vapor utilizados na indústria e nas usinas, o mais utilizado no mundo atualmente é o ciclo de Rankine (Wallas, 1990).

Neste trabalho, foram correlacionadas propriedades termodinâmicas (entalpia, entropia, energia interna e volume específico) da água desde baixas pressões e temperaturas até valores altos, abrangendo regiões próximas da região supercrítica. Essas propriedades termodinâmicas foram utilizadas nos balanços de energia e entropia nos diferentes tipos do ciclo Rankine para otimizar a eficiência termodinâmica.

2. CICLO DE RANKINE

O ciclo de Rankine é um ciclo ideal de potência a vapor, que, como sendo ideal, não envolve irreversibilidade interna, e possui quatro etapas básicas: fornecimento de calor na caldeira a pressão constante; expansão isentrópica na turbina; perda de calor no condensador a pressão constante; e compressão isentrópica na bomba (Çengel e Boles, 2013).

Considerando a água como fluido de trabalho, esta entra na caldeira no estado termodinâmico de líquido comprimido para sair, após o aquecimento, como vapor superaquecido e, em casos mais extremos e que necessitam de novos materiais resistentes à temperatura, como fluido supercrítico (Çengel e Boles, 2013). Este vapor, tendo alto conteúdo energético na entalpia, movimenta uma turbina e gera trabalho, resultando em uma mudança de estado do fluido, formando-se uma mistura líquido-vapor, a qual prossegue até o condensador. Nesta etapa, a mistura saturada líquido-vapor é condensada em líquido saturado, que por sua vez é bombeada através de um processo de compressão (líquido comprimido) até a pressão requerida na caldeira, logo prosseguindo até a caldeira, onde o processo se reinicia.

Para melhorar a eficiência do ciclo, muitas inovações foram criadas. Dentre elas, há o ciclo de Rankine com reaquecimento, em que a água que sai da turbina volta para a caldeira, onde ocorre um novo aquecimento e a água, após ser reaquecida, é direcionada até outra turbina, onde gera mais trabalho. Outra inovação é o ciclo de Rankine com regeneração, em que vapor é extraído da turbina em diversos pontos e usado para aquecer a água de alimentação da caldeira em dispositivos chamados de regeneradores, aquecedores de água de alimentação ou misturadores. (Çengel e Boles, 2013).

Em muitos casos, essas inovações podem ser misturadas, gerando ciclos de Rankine com reaquecimento e regeneração. Desta maneira, as configurações deste ciclo são diversas, o que abre uma gama de possibilidades, mas todas com um objetivo comum: aumentar ao rendimento ou eficiência do ciclo termodinâmico. Atualmente, o ciclo de Rankine é o mais utilizado no setor industrial para produzir trabalho mecânico ou de eixo, o qual é transformado em energia elétrica. As usinas termoelétricas usam desde gás natural até a fissão nuclear do urânio para aquecer a água nas caldeiras. Além disso, é também amplamente usado nas indústrias para aproveitar o vapor e/ou os subprodutos inflamáveis gerados durante o processo produtivo para a geração de energia elétrica. A indústria sucroalcooleira, por exemplo, utiliza a queima do bagaço de cana para a geração de calor para produzir trabalho, enquanto indústrias químicas que geram metano e outros gases inflamáveis como subproduto os utilizam para fornecer calor ao fluido que gera trabalho. Cada combustível usado requer equipamentos específicos para uma combustão eficiente para produzir mais trabalho no ciclo. (Granet, 1990).

3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.

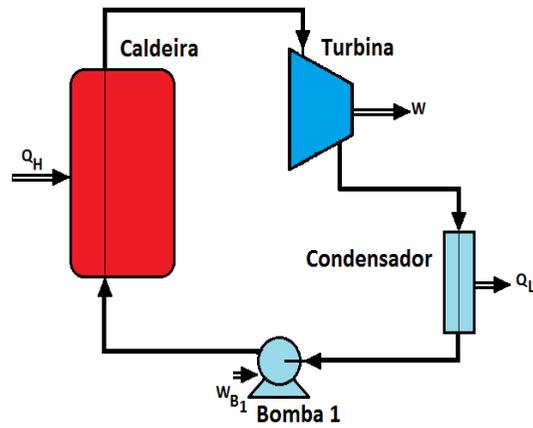
O programa, desenvolvido em MatLab e com uma interface em GUI, calcula os principais parâmetros de processo de diversos tipos de ciclos de Rankine, fornecendo os valores do calor fornecido na caldeira, o trabalho mecânico produzido pela(s) turbina(s), o trabalho requerido pela(s) bomba(s) e a eficiência do ciclo termodinâmico, considerando como fluido de trabalho a água. Além disso, outro programa em GUI pode correlacionar as propriedades termodinâmicas da água sob diferentes condições, conhecendo-se duas propriedades termodinâmicas do sistema.

Na opção dos ciclos de Rankine, o programa realiza a sub-rotina de simulação, apresentando uma figura com os diversos tipos disponíveis de ciclos de Rankine. O usuário deve escolher qual o tipo de ciclo Rankine que deseja utilizar, baseando-se nas opções que aparecem na Figura 1. Com o tipo de ciclo escolhido, o programa pede ao usuário os valores de pressão na caldeira, no condensador e, caso haja, no reaquecimento e no(s) misturador(es), além da temperatura na caldeira e, caso haja, no reaquecimento. A pressão deve ser dada em bar e a temperatura em °C. Com os valores, o programa começa os cálculos específicos para o caso selecionado. Este programa também permite escolher entre ciclos ideais e ciclos reais, necessitando, no caso dos ciclos reais, fornecer as eficiências isentrópicas de cada equipamento.

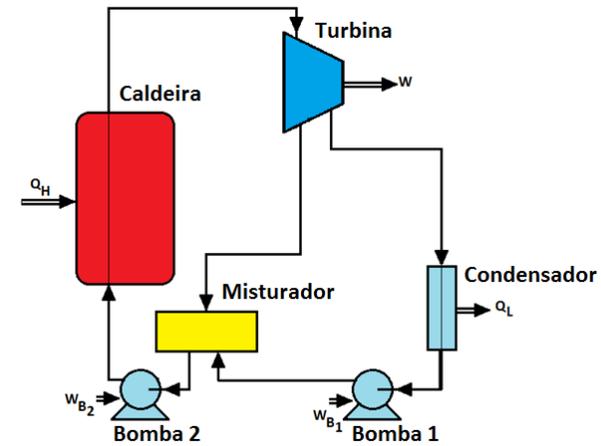
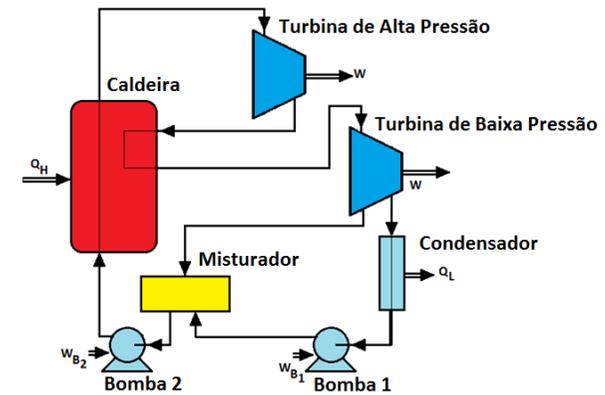
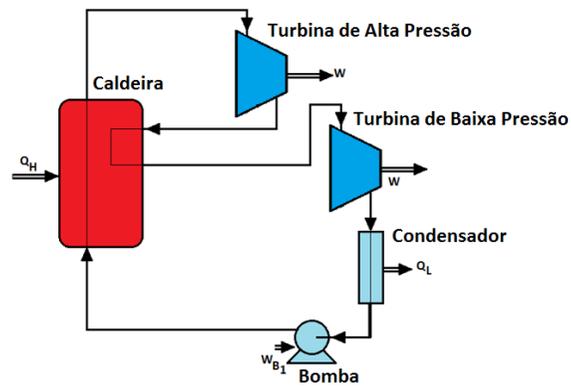
No segundo programa, é possível efetuar a correlação das propriedades termodinâmicas da água. Todas as propriedades termodinâmicas de um fluido podem ser calculadas caso se conheça, pelo menos, duas delas nas quais o fluido se encontra submetido (Michelsen e Mollerup, 2007). Assim, o programa possui várias opções de cálculo com duas propriedades termodinâmicas e em vários estados termodinâmicos (líquido comprimido, mistura saturada, vapor superaquecido). As opções que o usuário pode escolher são:

- 1) Pressão e Temperatura;
- 2) Pressão e Entalpia;
- 3) Pressão e Entropia;
- 4) Pressão e Volume Específico;
- 5) Pressão e Energia Interna;
- 6) Pressão e Título;
- 7) Temperatura e Entalpia;
- 8) Temperatura e Entropia;
- 9) Temperatura e Volume Específico;
- 10) Temperatura e Energia Interna;
- 11) Temperatura e Título.

1) Ciclo Rankine básico



2) Ciclo Rankine com regeneração

3) Ciclo Rankine com reaquecimento (TAP)¹ 4) Ciclo Rankine com reaquecimento (TAP)¹ e regeneração (TBP)²¹ TAP: Turbina de alta pressão² TBP: Turbina de baixa pressão

5) Ciclo Rankine com reaquecimento/regeneração (TAP)¹ 6) Ciclo Rankine com reaquecimento/regeneração (TAP)¹ e regeneração (TBP)²

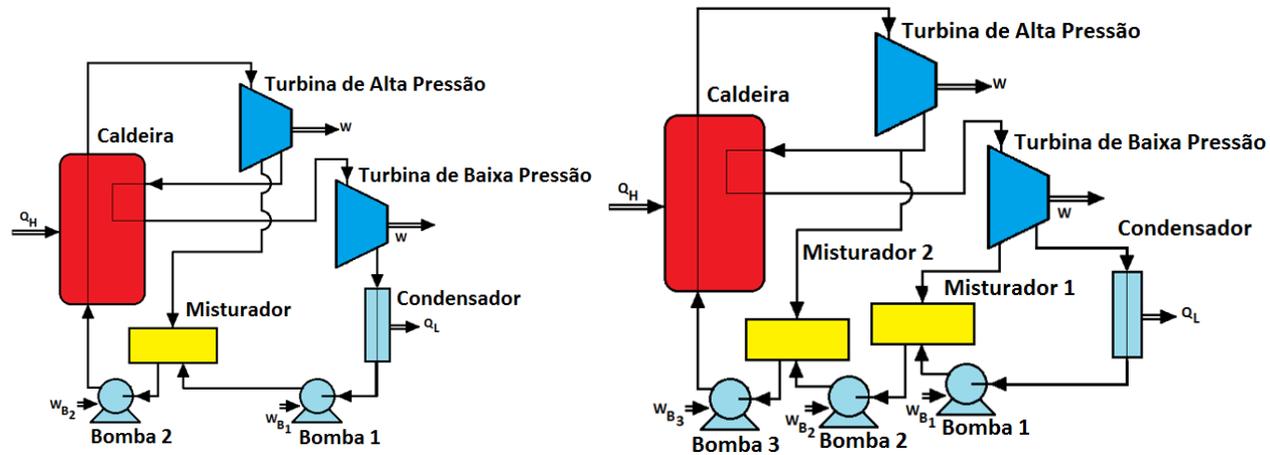


Figura 1. Tipos de ciclos Rankine disponibilizados pelo programa.

¹TAP: Turbina de alta pressão

²TBP: Turbina de baixa pressão

A pressão deve ser dada em bar, enquanto a temperatura deve ser em °C. A entalpia e energia interna são fornecidas em kJ/kg, a entropia em kJ/kg.K, o volume específico em m³/kg e o valor do título deve estar entre 0,0 e 1,0.

3.1. INTERVALO DE OPERAÇÃO.

Para garantir o bom funcionamento do programa, este possui faixas de aplicação que o auxiliam a fornecer valores com erros relativos pequenos e dentro de condições razoáveis. Assim, em cada uma das duas opções apresentadas pelo programa no início, o valor fornecido pelo usuário é analisado para verificar se está dentro das especificações ideais. Caso o valor dado seja adequado, o programa inicia os cálculos. Caso contrário, uma mensagem aparecerá, mostrando a faixa de aplicação adequada, cabendo então ao usuário escolher outros valores que se enquadrem dentro dos limites permitidos pelo programa.

No caso da simulação dos diferentes tipos de ciclo Rankine, os limites controlados pelo programa utilizam como base as resistências térmicas dos materiais atuais usados nas construções dos equipamentos, além de assumir que o fluido na saída da caldeira deverá estar no estado de vapor superaquecido e, na sua entrada, como líquido comprimido. Dessa maneira, o programa trabalha com a caldeira na faixa de pressão de 0,0062 até 300,0 bar e na faixa de temperatura entre 0,01°C até 620,0 °C. Além disso, o programa analisa o estado termodinâmico da água na saída da caldeira, garantindo que o fluido esteja em um estado termodinâmico apropriado. Para os ciclos com regeneração e reaquecimento, a faixa de temperatura é a mesma da caldeira, porém a pressão deve ter um valor abaixo da pressão crítica (220,9 bar).

Na correlação das propriedades termodinâmicas da água, a pressão deve estar na faixa de 0,0062 bar até 300,0 bar, enquanto a temperatura deve estar entre 0,01°C e 1300,0 °C. Para estabelecer os limites para as demais propriedades termodinâmicas, como entalpia e entropia, o programa realiza os cálculos utilizando como base o valor máximo e o valor mínimo da propriedade escolhida à pressão já estabelecida pelo usuário.

4. RESULTADOS E DISCUSÕES

4.1. SIMULAÇÃO DO CICLO DE RANKINE

Os valores obtidos neste trabalho foram comparados com os valores obtidos em outros programas (disponíveis na internet) e com exemplos apresentados em livros.

No endereço do site 1 (link 1, 2015), é possível encontrar uma applet com os seguintes tipos de ciclo Rankine: básico, regenerativo, com reaquecimento e com reaquecimento e regeneração (TBP). Os outros tipos de ciclo Rankine utilizados neste trabalho foram comparados com exemplos apresentados na literatura (Milton, 1986; Çengel e Boles, 2013).

Os resultados obtidos são apresentados em termos do erro calculado a partir dos valores da eficiência térmica do ciclo, utilizando a seguinte equação:

$$Erro = \frac{\left| Ef_{neste\ trabalho} - Ef_{exemplo} \right|}{Ef_{neste\ trabalho}} * 100\% \quad (1)$$

A eficiência do ciclo de Rankine obtida neste trabalho, $Ef_{\text{neste trabalho}}$, é calculada pela equação:

$$Ef_{\text{neste trabalho}} = \frac{\sum W_{\text{turbinas}} - \sum W_{\text{bombas}}}{Q_{\text{caldeira}}} \quad (2)$$

Nas Tabelas 1-3, são apresentados os dados das propriedades termodinâmicas de entrada necessárias para realizar a simulação dos diferentes tipos de ciclo Rankine.

Os resultados, em termos da eficiência do ciclo termodinâmico, para o ciclo básico de Rankine, Rankine regenerativo, Rankine com reaquecimento (TAP) e o Rankine com reaquecimento (TAP) e regeneração (TBP) são apresentados nas Tabelas 1-2, respectivamente. Nessas tabelas, as eficiências são comparadas com as obtidas no link1 (2015). Percebe-se que o erro foi menor de 2,00 % para os quatro tipos de Ciclo Rankine mencionados anteriormente.

Na Tabela 3, são apresentados os resultados em termos das eficiências do ciclo Rankine com reaquecimento/regeneração (TAP) e do ciclo Rankine com reaquecimento/regeneração (TAP) e regeneração (TBP). Os resultados obtidos neste trabalho, também em termos da eficiência do ciclo termodinâmico, são comparados com os resultados dos exemplos apresentados na literatura (Milton, 1986; Çengel e Boles, 2013). Percebe-se que os erros são menores de 1,50 %

Os erros maiores que 1,0% provavelmente acontecem devido à diferença entre os valores das entalpias e entropias calculadas neste trabalho com as propriedades termodinâmicas utilizadas no link e na literatura.

Nota-se que, em condições de temperatura e pressão cada vez menores do que as condições críticas (220,9 bar e 374,1°C), os erros diminuem consideravelmente, devido provavelmente à dificuldade da obtenção dos valores de propriedades termodinâmicas perto da região crítica.

Tabela 1 – Resultados obtidos para o Ciclo Rankine (básico) e o Regenerativo

Ciclo básico de Rankine	Dados de entrada				Resultados		
	Pressão Caldeira (bar)	Temperatura Caldeira (°C)	Pressão Condensador (bar)		Eficiência (%)	Erro (%)	
	150	400	0,1	Trabalho Link 1	39,715 40,134	1,055	
	100	350	0,1	Trabalho Link 1	37,933 38,381	1,181	
Ciclo Rankine Regenerativo	Dados de entrada					Resultados	
	Pressão Caldeira (bar)	Temp. Caldeira (°C)	Pressão Condensador (bar)	Pressão Misturador (bar)		Eficiência (%)	Erro (%)
	150	400	0,1	40	Trabalho Link1	42,550 43,247	1,638
	100	350	0,1	10	Trabalho Link1	40,955 41,515	1,367

Tabela 2 – Resultados obtidos para o Ciclo Rankine com Reaquecimento (TAP) e com Reaquecimento (TAP) e Regeneração (TBP)

Ciclo Rankine com Reaquecimento (TAP)	Dados de entrada						Resultados		
	Pressão Caldeira (bar)	Temp. Caldeira (°C)	Pressão Cond. (bar)	Pressão Reaqu. (bar)	Temp. Reaqu. (°C)		Eficiência (%)	Erro (%)	
	150	400	0,1	40	350	Trabalho Link1	40,080 40,524	1,108	
	100	350	0,1	30	300	Trabalho Link1	38,072 38,667	1,563	
Ciclo Rankine com Reaquecimento (TAP) e Regeneração (TBP)	Dados de entrada							Resultados	
	Pres. Cald. (bar)	Temp. Cald. (°C)	Pres. Cond. (bar)	Pressão Reaqu. (bar)	Temp. Reaqu. (°C)	Pres. Mistur. (bar)		Eficiência (%)	Erro (%)
	150	400	0,1	40	350	40	Trabalho Link1	42,088 42,683	1,414
	100	350	0,1	30	300	10	Trabalho Link1	40,665 41,390	1,783

Tabela 3 – Resultados obtidos para o Ciclo Rankine com Reaquecimento/Regeneração (TAP) e com Reaquecimento/Regeneração (TAP) e Regeneração (TBP)

Ciclo Rankine com Reaquecimento/Regeneração (TAP)	Dados de entrada						Trabalho Livro	Resultados		
	Pressão Caldeira (bar)	Temperatura Caldeira (°C)	Pressão Condensador (bar)	Pressão Reaquecimento (bar)	Temperatura Reaquecimento (°C)	Pressão Misturador (bar)		Eficiência (%)	Erro (%)	
	125	550	0,2	50	550	10	Trabalho Livro	44,071 44,660	1,336	
	100	550	0,1	8	500	8	Trabalho Livro	44,337 44,400	0,142	
Ciclo Rankine com Reaquecimento/Regeneração (TAP) e Regeneração (TBP)	Dados de entrada							Trab. Livro	Resultados	
	Presão Caldeira (bar)	Temp. Caldeira (°C)	Pressão Condensador (bar)	Pressão Reaquecimento (bar)	Temp. Reaquecimento (°C)	Pressão Misturador 1 (bar)	Pressão Misturador 2 (bar)		Eficiência (%)	Erro (%)
	50	400	0,1	5	400	5	1,2	Trab. Livro	38,879 38,860	0,049
	150	600	0,1	40	600	40	5	Trab. Livro	49,957 49,200	1,515

4.2. CORRELAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA

Os resultados obtidos neste trabalho (Tabela 4) para a correlação das propriedades termodinâmicas da água foram comparados com os resultados obtidos por outros programas de predição de propriedades termodinâmicas da água: PropVap (Llagostera, 1998) e Computer Aided Thermodynamic Tables (CATT, 1996). A entalpia foi usada como propriedade termodinâmica de comparação e os valores obtidos foram comparados na região de superaquecimento, que é um dos estados termodinâmicos mais importantes em um ciclo Rankine. Foram utilizadas diferentes sub-rotinas, como mencionado na seção 3.

O programa PropVap calcula as propriedades da água a partir do ponto triplo até 190 bar e 1300°C usando equações de estado. Ele possui as seguintes opções: pressão e temperatura; pressão e entropia; pressão e entalpia; pressão e título.

O programa CATT calcula as propriedades termodinâmicas da água a partir de correlações utilizando várias sub-rotinas. Ele engloba as quatro regiões termodinâmicas (líquido comprimido, região de saturação, vapor superaquecido e fluido supercrítico) e opera em uma faixa de pressões e temperaturas mais ampla.

O erro relativo foi calculado a partir dos valores das entalpias obtidos neste trabalho em relação aos obtidos nos programas PropVap e CATT, utilizando a seguinte equação:

$$Erro H = \frac{|H_{\text{neste trabalho}} - H_{\text{programa}}|}{H_{\text{neste trabalho}}} \times 100\% \quad (3)$$

Tabela 4 – Resultados das propriedades termodinâmicas da água na região de vapor superaquecido obtidos neste trabalho e pelos programas PropVap e CATT.

Programa	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Entropia (kJ/kg.K)	Vol. esp. (m ³ /kg)	Entalpia (kJ/kg)	Erro H (%)
Trabalho			6,365	0,0343	3139,40	-
PropVap	80,0	400,00	6,363	0,0343	3138,30	0,0350
CATT			6,363	0,0343	3138,00	0,0446
Trabalho		716,60		0,0292	3880,97	-
PropVap	150,0	716,55	7,000	0,0292	3882,10	0,0291
CATT		716,60		0,0292	3882,00	0,0265
Trabalho		389,26	5,285		2659,16	-
PropVap	200,0	-	-	0,0090	-	-
CATT		387,80	5,424		2731,00	2,7016

Observa-se na Tabela 4 que, a pressões menores, o erro relativo entre os valores de entalpia obtidos neste trabalho e nos programas é menor. No entanto, quando a pressão aumenta, o erro também aumenta consideravelmente. Isso, provavelmente, deve-se à aproximação da região supercrítica da água (com pressão crítica de 220,9 bar), onde os estados termodinâmicos do líquido saturado e de vapor saturado não se distinguem, o que acarreta dificuldades na correlação das propriedades termodinâmicas nesta região. Assim, valores muito próximos a essa região possuem erros maiores.

Entretanto, a maioria dos processos industriais que utilizam a água como fluido de trabalho operam em condições moderadas. Assim, o programa feito neste trabalho

pode ser utilizado para a correlação de propriedades termodinâmicas da água no intervalo de pressões e temperaturas normalmente utilizado nas operações de processos industriais.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram obtidos ótimos resultados com o programa desenvolvido no software MatLab. Os erros relativos foram baixos e não ultrapassaram 3,0 % para pressões e temperaturas menores que as do ponto crítico da água (220,9 bar e 374,1°C), tanto para correlacionar as propriedades termodinâmicas da água como para simular os tipos de ciclos de Rankine. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi alcançando, proporcionando uma ferramenta versátil que pode contribuir a aprimorar o ensino de ciclos de potência nos cursos de Engenharia, assim como também dos processos industriais que utilizam mudanças de estado termodinâmico da água.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Computer-Aided Thermodynamic Tables (CATT), v. 3. John Wiley & Sons, Inc., 1996.

GRANET, I. *Termodinâmica e Energia Térmica*; 4ª edição; Editora Prentice-Hall; Rio de Janeiro, RJ, 1990.

Link 1. <http://www.engr.siu.edu/staff1/weston/thermo/Rankine/RankineCycles.html>; acessado em 27 de maio de 2015.

MICHELSEN, M.L.; MOLLERUP, J.M. *Thermodynamic Models: Fundamentals & Computational Aspects*. Tie Line Publications, 2da Ed., Dinamarca, 2007.

MILTON, G.H. *Problemas Resueltos Exámenes - Uni y Otros*; Ediciones Habich. Lima, Peru; 1986.

LLAGOSTERA, T. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, v. 3.03, 1998.

WALAS, S.M. *Chemical Process Equipment – Selection and Design*. Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering, Newton, MA, EUA, 1990.

ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. *Termodinâmica*. Porto Alegre: Editora Mc Graw Hill, 2013.

7. DIREITOS AUTORAIS

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