



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

CICLOS DE RANKINE – UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Marco Antônio R. Sacoman – sacoman@fc.unesp.br

Unesp, Departamento de Computação
Avenida Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01
17033-360 – Bauru – SP

Vanilda M. M. Chueiri – vanilda@fc.unesp.br

Eliete M. Gonçalves – elietemg@fc.unesp.br

Unesp, Departamento de Matemática
Avenida Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01
17033-360 – Bauru – SP

Resumo: *A Termodinâmica trata do calor, do trabalho e das propriedades das substâncias envolvidas com o calor e o trabalho. Considerando a importância que os Ciclos de Rankine têm quando se estuda a transformação de calor em trabalho, desenvolveu-se um programa computacional que resolve dois problemas clássicos que envolvem Ciclo com Reaquecimento e Ciclo Regenerativo. Sua utilização permite a solução e a otimização destes problemas. No primeiro caso, os problemas são resolvidos a partir da coleção completa dos parâmetros necessários, os quais são oferecidos pelo usuário. No segundo caso, o usuário deverá omitir alguns desses parâmetros e o programa selecionará os valores ótimos. Desta forma, a utilização do programa proporcionará não apenas a solução dos problemas, como permitirá que o usuário adquira sensibilidade na seleção dos parâmetros envolvidos.*

Palavras-chave: *Termodinâmica, Ciclo de Rankine, Ferramenta computacional*

1. INTRODUÇÃO

A Termodinâmica trata do calor, do trabalho e das propriedades das substâncias envolvidas com o calor e o trabalho. Neste texto estuda-se a transformação de calor em trabalho, utilizando-se o Ciclo de Rankine, que considera um esquema ideal de geração de vapor. Com este objetivo, desenvolveu-se um programa que permite resolver e otimizar problemas envolvendo Ciclo com Reaquecimento e Ciclo Regenerativo. A utilização do programa proporcionará a solução dos problemas, além de possibilitar que o usuário adquira sensibilidade na seleção dos parâmetros envolvidos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Estudaram-se princípios básicos de termodinâmica e, mais especificamente, problemas de ciclos térmicos, para a obtenção dos conceitos necessários para a modelagem de problemas de fluidotérmica, com a finalidade de desenvolver o programa, que oferece vários recursos típicos de um programa desenvolvido para ambiente Windows, escrito utilizando o ambiente integrado de desenvolvimento Delphi - versão 7.

Foram desenvolvidos modelos para a solução de problemas de ciclos térmicos compostos de caldeira, turbina, condensador, aquecedor e bomba. O objetivo desse programa é otimizar o rendimento térmico do ciclo.

Foram modelados dois tipos de ciclos:

- ciclo com reaquecimento;
- ciclo regenerativo.

O programa exige apenas uma entrada de dados extremamente simples e a opção de otimização. Tendo sido desenvolvido para ambiente operacional gráfico, o programa explora toda a potencialidade inerente a esse tipo de ambiente. São características fundamentais desse programa:

- menu para a seleção do tipo de problema, opção de apresentação de figuras, opção de impressão e armazenamento da solução em arquivo;
- sistema de ajuda, que permite ao usuário aprender a utilizar o programa;
- apresentação de figuras referentes ao tipo de problema escolhido;
- entrada de dados simplificada, com consistência de erros por parte do usuário;
- opção de cálculo do rendimento térmico do ciclo ou otimização de parâmetros que levem ao rendimento máximo possível.

O programa explora outros recursos do ambiente operacional gráfico Windows, que devem ser observados em um projeto de computação, tal como acesso à calculadora (útil durante a entrada de dados ou análise dos resultados) e ao diretório em uso, através do Explorer ou de janela do DOS.

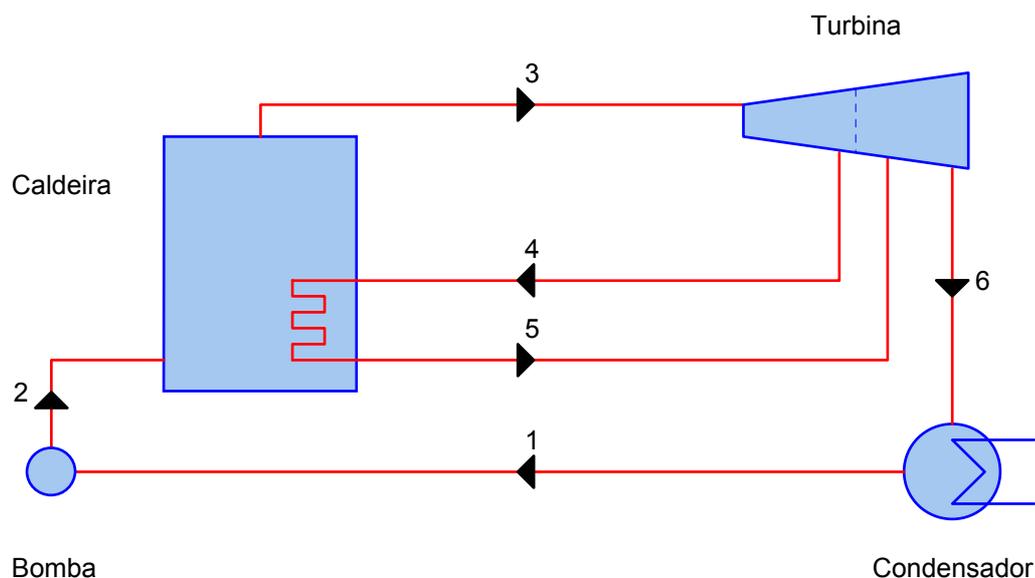


Figura 1 – Ciclo com Reaquecimento

O objetivo é otimizar o rendimento térmico do ciclo. As Figuras 1 e 2 mostram os ciclos dos problemas exemplo.

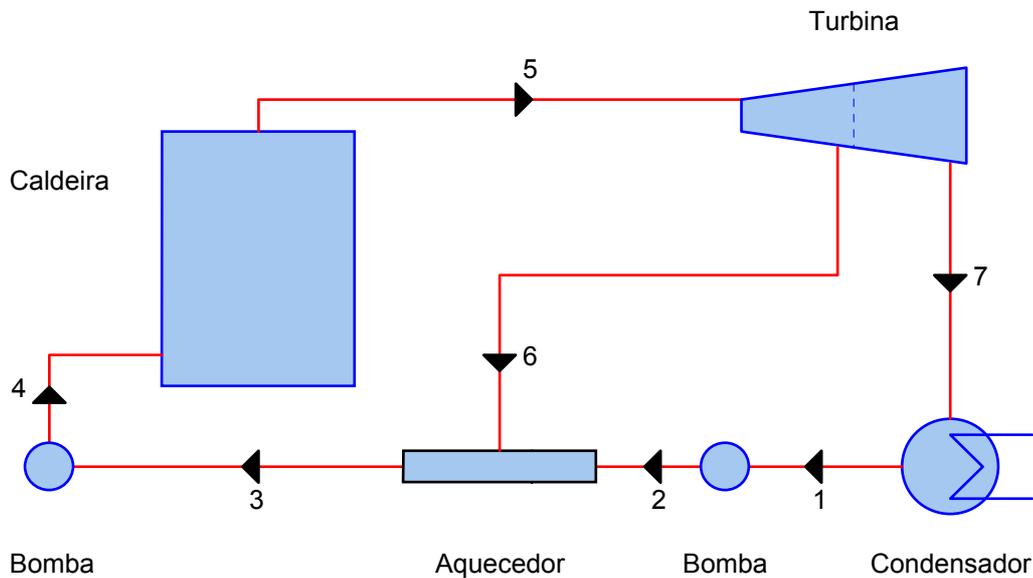


Figura 2 – Ciclo Regenerativo

As restrições dos problemas são referentes às condições de equilíbrio térmico nos nós em evidência nas figuras, considerando-se a entalpia e a entropia na entrada e saída de cada um dos componentes do ciclo.

As variáveis de projeto são, basicamente, temperatura, pressão, entalpia e entropia. Há outras grandezas que são variáveis para cada solução e que estão relacionadas às variáveis de projeto através de equações que são sempre verificadas.

O programa é de fácil utilização, onde várias opções são escolhidas através de sua barra de ferramentas e de seus menus.

A Figura 3 apresenta o Quadro Principal do programa, a barra de ferramentas e a hierarquia de seus menus.

A barra de ferramentas contém, pela ordem, os botões *Novo*, *Salvar*, *Salvar Como*, *Imprimir*, *Mostrar Esquema*, *Dados*, *Solução*, *Explorer*, *DOS*, *Calculadora*, *Ajuda* e *Sobre*, como apresentado na Figura 3-(a).

O botão *Novo* inicia um novo problema, destruindo dados e solução anterior, caso existam e apresenta os campos de entrada de dados do problema. O tipo de problema criado é definido através do menu apresentado por este botão, como mostra a Figura 3-(b). Este menu contém os itens *Ciclo com Reaquecimento* e *Ciclo Regenerativo*. Ao se marcar um desses itens, o outro será desmarcado.

Os botões *Salvar*, *Salvar Como* e *Imprimir* só estarão habilitados quando houver um problema já resolvido. O botão *Imprimir* apresenta um menu para seleção de impressão, previsão da impressão e configuração da impressora, como apresentado na Figura 3-(c).

O botão *Esquema* pode ser marcado e desmarcado, fazendo com que o esquema do ciclo em utilização seja mostrado ou não no quadro principal do programa. A Figura 4 mostra o Quadro Principal do programa com o esquema visível.

O botão *Dados* permite que se consultem os dados de entrada e se efetuem alterações. Este botão pode ser marcado e desmarcado, fazendo com que os campos de entrada de dados do problema em utilização sejam mostrados ou não no quadro principal do programa, como apresentado na Figura 5-(a).

O botão *Solução* executa o problema de avaliação ou de otimização informado através

dos dados dos campos de entrada de dados e apresenta sua solução. Este item estará habilitado somente quando houver entrada de dados válida. As Figuras 6 e 7 apresentam exemplos de soluções.

Os botões *Explorer*, *DOS* e *Calculadora* lançam esses aplicativos. O botão *Ajuda* apresenta o arquivo de ajuda, no formato CHM que contém instruções para utilização do programa e resumo da teoria referente aos problemas abordados. O botão *Sobre* apresenta informações sobre a autoria e direitos de utilização do programa.

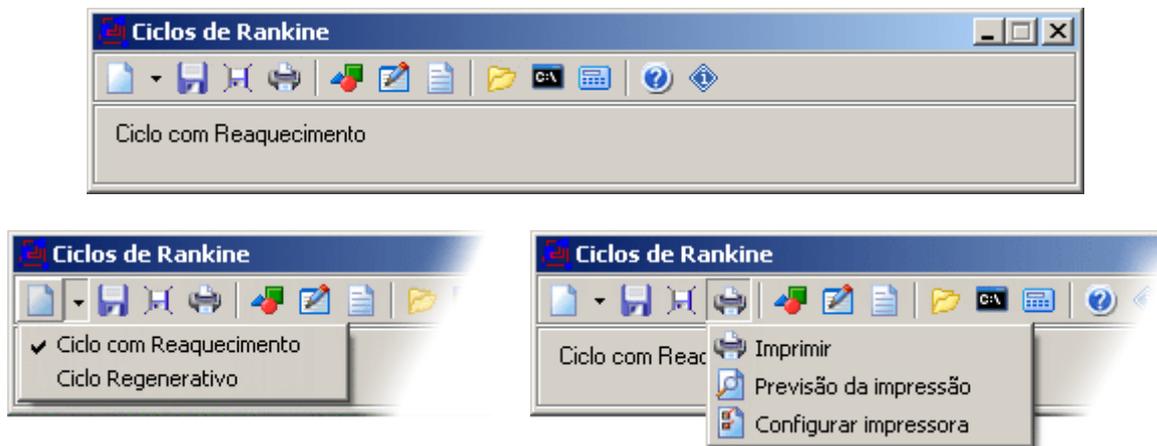


Figura 3 - Quadro Principal do programa e seus itens de menu

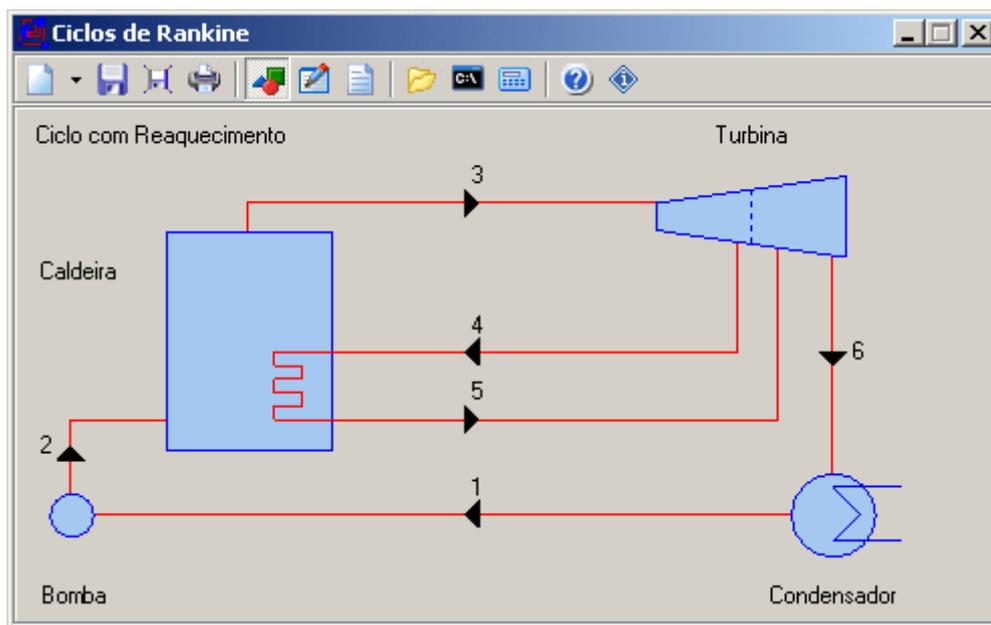
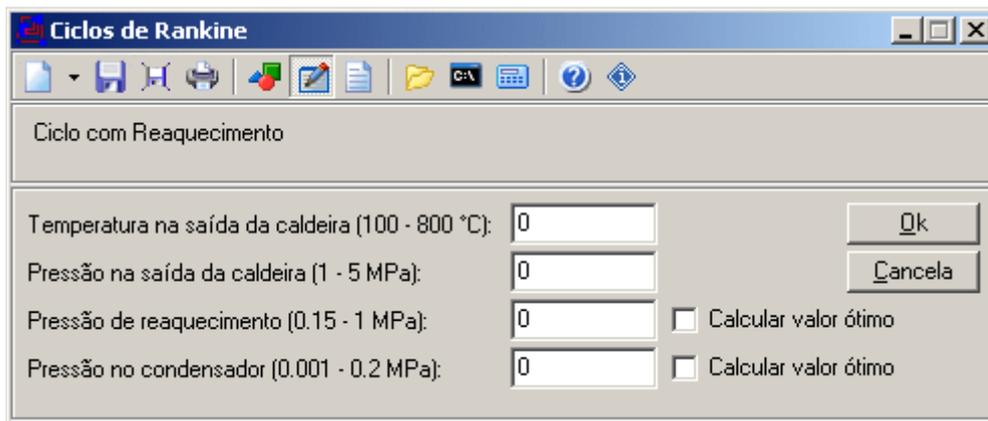


Figura 4 - Quadro Principal do programa com esquema visível

A entrada de dados verifica consistência quanto a erro de digitação e quanto aos seus limites. No caso de erro por parte do usuário, são apresentados Quadros de Advertência informando sobre o erro cometido, como mostram as Figuras 5-(b) e 5-(c). Neste caso, após fechar o Quadro de Advertência, o cursor retorna ao campo de edição com dado errado.



(a)



(b)



(c)

Figura 5 - Quadro de Entrada de Dados e Quadros de Advertência de entrada incorreta de dados

Após a entrada de dados, pode-se pressionar o botão *Solução* e, se o problema apresentar solução, será mostrado o Quadro de Soluções como mostrado na Figura 6-(a). Caso o problema não apresente solução, será apresentado o Quadro de Informação mostrado na Figura 6-(b), se o usuário solicitou apenas o cálculo do rendimento, ou será apresentado o Quadro de Informação mostrado na Figura 6-(c), se o usuário solicitou otimização do rendimento.

Para exemplificar a utilização, considera-se o problema onde um profissional com experiência em equipamentos de fluidotérmica escolhe, para um Ciclo com Reaquecimento, o conjugado 20 kgf/cm^2 e 300°C para pressão e temperatura na saída da caldeira, pressão de reaquecimento 4 kgf/cm^2 e pressão no condensador $0,07 \text{ kgf/cm}^2$. O rendimento termodinâmico do ciclo é mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Cálculo do rendimento térmico do ciclo

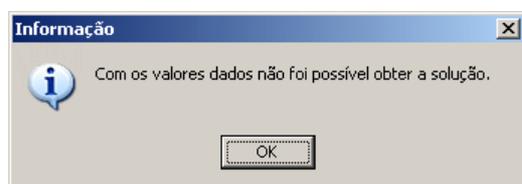
Nó	t(°C)	p(MPa)	v(m³/kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)
1	38,7	0,007	0,0010	161,61	
2	211,4	2,000	0,0012	163,75	
3	->300,0	-> 2,000	0,1281	3025,09	6,7776
4	142,9	-> 0,400	0,0011	2686,17	6,7776
5	300,0	0,400	0,6679	3066,45	7,5748
6	38,7	-> 0,007	0,0010	2350,97	7,5748
Turbina		Wt1 = 338,88	Wt2 = 715,48	Wt = 1054,40 (kJ/kg)	
Condensador		Ql = 2189,36	(kJ/kg)		
Bomba		Wb = 2,15	(kJ/kg)		
Caldeira		Qha = 2861,30	Qhr = 380,29	Qh = 3241,59 (kJ/kg)	
Ciclo		Wl = 1052,23	(kJ/kg)	rendimento = 0,3246	

Ciclos de Rankine

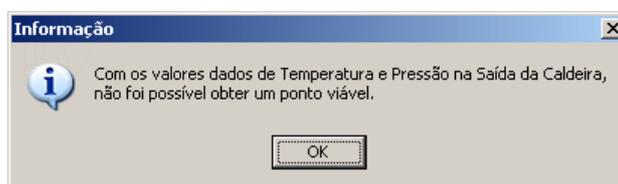
Ciclo com Reaquecimento

Nó	t(°C)	p(MPa)	v(m³/kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)
1	38,7	0,007	0,0010	161,61	
2	211,4	2,000	0,0012	163,75	
3	->300,0	-> 2,000	0,1281	3025,09	6,7776
4	142,9	-> 0,400	0,0011	2686,17	6,7776
5	300,0	0,400	0,6679	3066,45	7,5748
6	38,7	-> 0,007	0,0010	2350,97	7,5748
Turbina		Wt1 = 338,88	Wt2 = 715,48	Wt = 1054,40 (kJ/kg)	
Condensador		Ql = 2189,36	(kJ/kg)		
Bomba		Wb = 2,15	(kJ/kg)		
Caldeira		Qha = 2861,30	Qhr = 380,29	Qh = 3241,59 (kJ/kg)	
Ciclo		Wl = 1052,23	(kJ/kg)	rendimento = 0,3246	

(a)



(b)



(c)

Figura 6 - Quadro de Solução e Quadros de Informação de inexistência de solução

Considera-se o mesmo problema, com otimização da pressão de reaquecimento. O rendimento termodinâmico do ciclo é mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Cálculo do rendimento térmico do ciclo, com otimização da pressão de reaquecimento

Nó	t(°C)	p(MPa)	v(m ³ /kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)
1	38,7	0,007	0,0010	161,61	
2	211,4	2,000	0,0012	163,75	
3	->300,0	-> 2,000	0,1281	3025,09	6,7776
4	177,2	-> 0,906	0,0011	2852,55	6,7776
5	300,0	0,906	0,2745	3052,68	7,1527
6	38,7	-> 0,007	0,0010	2219,38	7,1527
Turbina		Wt1 = 172,50	Wt2 = 833,26	Wt = 1005,79 (kJ/kg)	
Condensador		Ql = 2057,77	(kJ/kg)		
Bomba		Wb = 2,15	(kJ/kg)		
Caldeira		Qha = 2861,30	Qhr = 200,09	Qh = 3061,43 (kJ/kg)	
Ciclo		Wl = 1003,62	(kJ/kg)	rendimento = 0,3278	

Considera-se o mesmo problema, com otimização da pressão de reaquecimento e da pressão no condensador. O rendimento termodinâmico do ciclo é mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Cálculo do rendimento térmico do ciclo, com otimização da pressão de reaquecimento e da pressão no condensador

Nó	t(°C)	p(MPa)	v(m ³ /kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)
1	6,7	0,001	0,0010	28,05	
2	211,4	2,000	0,0012	30,19	
3	->300,0	-> 2,000	0,1281	3025,09	6,7776
4	172,5	-> 0,860	0,0011	2830,44	6,7776
5	300,0	0,860	0,3071	3055,19	7,2067
6	6,7	-> 0,001	0,0010	2016,49	7,2067
Turbina		Wt1 = 194,64	Wt2 = 1038,70	Wt = 1233,35 (kJ/kg)	
Condensador		Ql = 1988,44	(kJ/kg)		
Bomba		Wb = 2,16	(kJ/kg)		
Caldeira		Qha = 2994,86	Qhr = 224,75	Qh = 3219,61 (kJ/kg)	
Ciclo		Wl = 1231,17	(kJ/kg)	rendimento = 0,3824	

A comparação dos resultados mostra um rendimento de 32,46% para o primeiro caso, de 32,78% para o segundo e de 38,24% para o terceiro. Houve, portanto, um incremento de rendimento da ordem de 17,8% entre o primeiro caso e o terceiro.

Para efeito de comparação de seus itens, a Figura 7 apresenta o Quadro de Soluções, com os mesmos dados, de um problema de cálculo do rendimento térmico do Ciclo Regenerativo. Uma comparação com a Figura 6 mostra essas diferenças.

Nó	t (°C)	p (MPa)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
1	38,7	0,007	0,0010	161,61	
2	142,9	0,400	0,0011	162,03	
3	142,9	0,400	0,0011	601,22	
4	211,4	2,000	0,0012	603,02	
5	->300,0	-> 2,000	0,1281	3025,09	6,7776
6	142,9	-> 0,400	0,0011	2686,17	6,7776
7	38,7	-> 0,007	0,0010	2102,40	6,7776

Turbina	$W_{t1} = 338,88$	$W_{t2} = 482,19$	$W_t = 821,07$	(kJ/kg)
Condensador	$Q_1 = 1940,79$	(kJ/kg)		
Bomba	$W_{bc} = 0,41$	(kJ/kg)		
Aquecedor	$m = 0,73$			
Bomba	$W_{ba} = 1,80$	(kJ/kg)		
Caldeira	$Q_h = 2422,06$	(kJ/kg)		
Ciclo	$W_l = 818,94$	(kJ/kg)		rendimento = 0,3381

Figura 7 - Quadro de Solução (Ciclo Regenerativo)

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação computacional resultou em um programa totalmente automatizado, que permite que o usuário possa se limitar à entrada de dados, obtendo assim a solução ótima do problema.

O presente programa poderá ser, ainda, transformado em um sistema complexo, de forma que o usuário possa escolher, através de menu ou de barra de ferramentas, uma configuração particular para seu problema de fluidotérmica, sem ter que modelar seu próprio problema. Como exemplo, o usuário poderia escolher quantas turbinas fazem parte do sistema, dispô-las em uma topologia que lhe convenha e informar sua finalidade, como geração de energia elétrica, e calcular o rendimento que o sistema lhe oferece. Poderia, ainda, introduzir outros equipamentos, como moenda, não prevista na lista de equipamentos do programa atual. Desta forma, seria possível "projetar" sua instalação industrial, com auxílio do programa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLEN, H. B. **Thermodynamics**. New York : John Wiley & Sons, 1960.

CANTÙ, M. **Mastering Delphi**. Berkeley : Sybex, 1995. 1500p.

VAN WYLEN, G. J. & SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo : Edgar Blücher, 1993. 318p.

RANKINE CYCLES – A COMPUTATIONAL TOOL

Abstract: *The Thermodynamics studies heat, of the work and the properties of involved substances with heat e the work. Rankine cycles have great importance in the study of transformation of heat in work, a program computational was developed to solve two classic problems that involve Cycle with Reheating and Regenerative Cycle. Its use allows the solution and optimization of these problems. In the first case, the problems are solved using the complete collection of the necessary parameters, which are offered for the user. In the other case, the user must omit some of these parameters e the program will select the optimum values. So, the use of program will not only provide the solution of the problems, as it will allow that user acquires sensitivity in the election of the involved parameters.*

Key-words: *Thermodynamics, Rankine cycles, Computational tool*