



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

OTIMIZAÇÃO DE UM CICLO TERMODINÂMICO VISANDO AS NECESSIDADES DE UM FUTURO PRÓXIMO

Helena Carvalho Mendes, len_inh_a@hotmail.com¹

José Marcio do Amaral Vasconcellos, jmarcio@peno.cope.ufrj.br²

¹UFRJ, Ilha do Fundão, Cidade Universitária – Centro de Tecnologia - blocoI /sala 205 - LabECO,

²COPPE/UFRJ, Programa de engenharia naval e oceânica, caixa postal: 68508, 21941-972,

Resumo: *Uma das grandes preocupações mundiais dos últimos anos vem sendo a questão dos combustíveis não renováveis. Grande parte da atual fonte de energia ainda é baseada em ciclos térmicos alimentados com fontes de calor por queima de combustíveis fósseis. O objetivo desse trabalho é otimizar esse ciclo térmico, determinando a quantidade mínima de calor que deve ser entregue ao ciclo por meio de queima de combustível para obter o máximo de trabalho líquido e a maior eficiência térmica possível. Analisaremos, também, a possibilidade de inserir regeneradores e reacondicionadores no ciclo, separados ou simultaneamente, com o intuito de obter as melhores condições de funcionamento. Com a otimização dos ciclos será possível aumentar as eficiências direcionando para os usos específicos de cada ciclo e, ao mesmo tempo, economizar combustível diminuindo a poluição emitida pela combustão.*

Palavras-chave: *Otimização; Ciclos; Termodinâmicos; Eficiência*

1. INTRODUÇÃO

Apesar da vasta tecnologia alcançada pelo homem ao longo dos séculos, ainda somos dependentes das fontes de energia não renováveis. Com o crescimento do conhecimento e das tecnologias disponíveis, foram surgindo diversos equipamentos com finalidades cada vez mais específicas, e, aqueles que já existiam foram se aperfeiçoando. Porém, ainda não foi possível achar uma fonte de energia que descartasse por completo os combustíveis fósseis.

Embora já exista o mercado de automóveis elétricos, no início de 2008 já circulavam pelo mundo mais de 1 bilhão de veículos de motores de combustão interna, conforme anuncia o artigo do professor Illah Nourbakhsh, publicado pela “inovação tecnológica”. Esse exemplo ilustra o aumento exponencial do uso de motores de combustão em todo o planeta que vem gerando dois grandes problemas para a humanidade: o alto índice de poluição provocado pela queima excessiva de combustíveis e o término dos recursos não renováveis disponíveis no planeta.

Como uma solução que demanda a troca de todos os motores de combustão por motores de energia limpa é uma solução de longo prazo, este artigo trabalhará em cima dos motores disponíveis no mercado e, otimizando suas condições de operação, estabelecerá a melhor situação para que haja o menor gasto de combustíveis obtendo a máxima eficiência possível.

2. MOTORES DE COMBUSTÃO X MOTORES ELÉTRICOS

Uma das soluções possíveis para amenizar o problema da emissão de poluentes foi a utilização de motores elétricos. Esses motores apresentam uma série de vantagens, entre elas o baixo custo da matéria-prima, ausência de ruídos e comandos simples. Porém o que torna esses motores tão interessantes é o fato de que a energia elétrica é rapidamente renovável e esses motores não emitem resíduos poluentes. Motores desse tipo já são usados em locomotivas em todo o mundo tanto para transporte de carga quanto para pessoas em altas velocidades.

Porém, os problemas dos motores elétricos começam na sua fabricação. Para substituir os motores de combustão, em muitos casos, seria necessário que esses motores fossem alimentados por uma bateria. Uma bateria é constituída de alguns elementos tóxicos, isso faz com que, não apenas sua confecção seja poluente, mas seu descarte seja um risco ambiental. Outros problemas são a diminuição na capacidade de carga no decorrer da vida útil, e, o que vem sendo a maior barreira para os fabricantes de motores elétricos automotivos, a autonomia das baterias.

Uma das grandes vantagens dos veículos com motores a combustão é o fato de funcionar por horas sem parar e, caso venha a ficar sem combustível, a sempre um posto para um rápido reabastecimento e, assim, mais horas de autonomia. No mês de janeiro de 2010, no salão de automóveis de Detroit, vários carros elétricos foram apresentados, porém poucos tinham autonomia de mais de 100 quilômetros, como foi apresentado na reportagem do jornal “Estadão”, enquanto no Brasil os carros flex têm em média 500 a 600 quilômetros entre cada reabastecimento. E ainda há a questão de onde reabastecer, enquanto um tanque leva poucos minutos para ser completamente cheio uma bateria pode levar algumas horas, e, por mais que venham a ter postos com dispositivos para o carregamento dessas baterias, pode ser um desconforto para o motorista.

Em uma reportagem publicada pela revista Automotive Engineering International em agosto de 2009, o diretor geral executivo sênior da Mazda, Nobuhiro Hayama revela que a estratégia para o futuro da Mazda baseia-se em melhorar o consumo global da frota em 30% e, para isso, a empresa vem investindo em uma nova geração de motores de combustão interna. Embora a eletrificação acelere nos próximos 5 anos, a Mazda acredita que veículos puramente elétricos são apenas uma ponta muito pequena da pirâmide de fonte de força eletromotriz. O movimento de eletrificação deve ganhar muita força entre os híbridos, porém a grande massa ainda será constituída principalmente de motores de combustão interna.

Entretanto, o problema do combustível renovável vem sendo solucionado no Brasil com a sua substituição pelo uso do álcool etílico, fabricado a partir da cana de açúcar. Porém, esta solução não será considerada por este artigo, pois mostra-se de difícil realização em escala global, onde seria necessário uma plantação muito grande para conseguir suprir a demanda, além de que, estudos recentes feitos pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e publicados pelo “Mercado Ético”, mostram que, motores movidos a álcool etílico são mais poluentes do que os movidos a combustíveis fósseis.

É com base nesses dados que concluímos que, no presente momento, a melhor solução seria otimizar as condições de funcionamento dos motores a combustão para que esses possam atingir uma melhor eficiência com um menor gasto de combustíveis.

3. CICLO ESCOLHIDO

Para esse experimento, foi escolhida para ser otimizada uma planta de combustão externa, o ciclo Rankine, que é comumente encontrado em estações de produção de energia, devido sua alta versatilidade. Nesse ciclo o trabalho é gerado ao aquecer e resfriar alternadamente e, como o ciclo é fechado, repetidamente um fluido de trabalho, normalmente água. O aquecimento ocorre por meio da queima de combustível na caldeira, objetivando a vaporização do fluido devido à transferência de calor.

A planta será modificada de diferentes formas, como já apresentado em alguns trabalhos (Van Wylen, 2003; Moran & Shapiro, 2007), com adição de regeneradores e reaquecimentos, com fim de se obter a melhor situação de operação.

No primeiro caso será utilizada uma planta Rankine simples, onde o fluido passa por uma caldeira, onde ocorre o ganho de calor por meio da queima de combustível, seguida de uma turbina, resultando no trabalho produzido pelo ciclo e, conseqüentemente, ocorrerá um superaquecimento do fluido, um condensador, onde será retirado o calor em excesso, e uma bomba, onde ocorrerá a sua compressão, retornando a caldeira para fechar o ciclo, conforme mostrado na fig. (1).

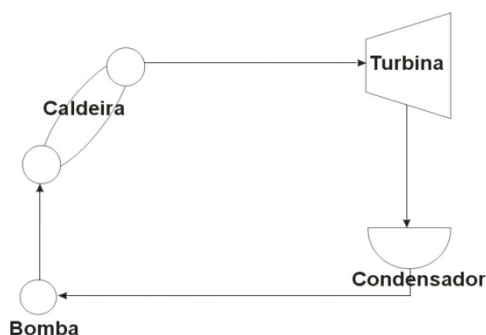


Figura 1. Planta do ciclo rankine simples

No segundo caso introduziremos um estágio de reaquecimento no ciclo, representado na fig. (2). Será utilizada como base a planta do ciclo simples, porém serão utilizadas duas turbinas em série, uma de alta e uma de baixa pressão. Ao passar pela turbina de alta o fluido é re-encaminhado para a caldeira, onde aumentará sua temperatura e retornará à turbina de baixa para continuar a produção de trabalho mecânico e seguir o trajeto do ciclo simples.

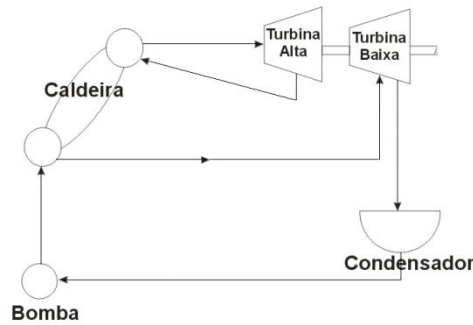


Figura 2. Planta do ciclo Rankine com reaquecimento

No terceiro caso, ainda com base no ciclo simples, será adicionado um regenerador que pode ser observado na fig. (3). A regeneração ocorre por meio da transferência de calor de duas linhas de fluido, uma quente que precisa ser resfriada e uma fria que precisa ser aquecida e, para isso, existem dois sistemas: o trocador de calor aberto e o fechado. No trocador de calor aberto, os dois fluidos são adicionados simultaneamente obtendo a melhor troca de calor possível, porém havendo a mistura dos fluidos. No trocador fechado os fluidos não têm contato direto, um fluido fica na câmara enquanto outro passa por tubos existentes dentro do trocador. O trocador a ser usado é uma do tipo aberto.

Como no segundo caso, existirão duas turbinas, a de alta e a de baixa pressão, uma linha de fluido será retirada da turbina de alta sendo encaminhada para uma câmara de mistura posicionada após o condensador. Como ocorre a mistura dos fluidos, deve-se tomar o cuidado para que todas as linhas fiquem com a mesma pressão, por isto outra bomba é adicionada entre o condensador e o trocador. Desta forma, a temperatura média do fluido em circulação aumentará.

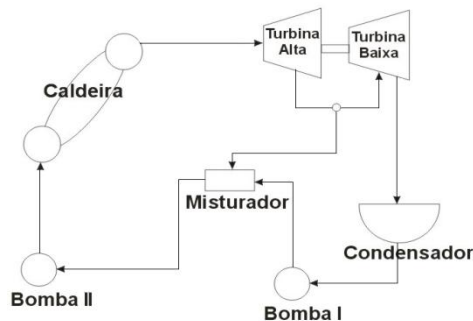


Figura 3. Planta do ciclo rankine com regeneração

No quarto e último caso, representado na fig. (4), será combinado o reaquecimento com a regeneração, com dois estágios de regeneração, um aberto e um fechado. Neste caso, o fluido passará pela caldeira e se encaminhará para a turbina de alta, de onde uma fração deste será retirada para repassar pela caldeira realizando o reaquecimento, porém antes de retornar a caldeira, uma pequena parte é desviada para o trocador fechado. A fração reaquecida retornará para a turbina de baixa onde uma outra parte será retirada para o trocador aberto enquanto o restante seguirá para o condensador. A fração no condensador passará por uma bomba e se unirá a outra no trocador aberto, de onde seguirá para uma segunda bomba para poder passar pelo trocador fechado. Enquanto isso, como não ocorre a mistura no trocador fechado o fluido que veio da turbina de alta deve passar por uma terceira bomba com fim de alcançar a pressão do fluido que veio da segunda para se unirem em uma câmara de mistura, de onde regressarão a caldeira fechando o ciclo.

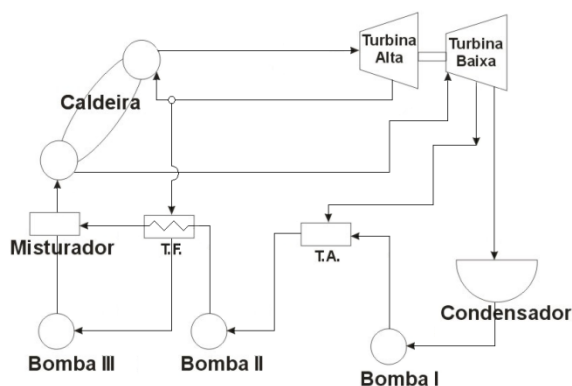


Figura 4. Planta do ciclo rankine com reaquecimento e regeneração

Neste artigo irá avaliar os ciclos operando em condições ideais, considerando eficiência de 100% em todos os equipamentos já que o objetivo é a comparação entre as eficiências de cada ciclo nas mesmas situações. Também não será considerado o custo de cada equipamento extra usado para modificar o ciclo, pois como dito anteriormente está sendo analisado apenas o impacto no meio.

4. OTIMIZANDO OS CICLOS

Problemas de otimização consistem em tentar maximizar ou minimizar uma determinada função escolhendo sistematicamente valores para variáveis reais ou inteiras, dependendo apenas da existência ou não de restrições, como apresentado no trabalho de Aror (1989).

No caso de haver mais de um objetivo a ser maximizado/minimizado o problema passa a se chamar função de multiobjetivos. O trabalho de Kreher & Stinson (1999) mostra que, quando esses objetivos são discordantes, os resultados encontrados constituem um uma rede complexa chamada fronteira de pareto, não havendo solução exata, e sim uma gama de resultados que atendem as duas exigências. A partir daí, qualquer um dos resultados constituintes da fronteira é uma solução otimizada para o problema em questão. Para escolher a melhor solução, deve-se levar em conta o fator mais importante e selecionar um dentre aqueles resultados existentes na fronteira.

Para avaliar a melhor condição de funcionamento do ciclo, utilizaremos o programa de otimização ModeFrontier®. Com a ajuda deste software será estabelecido como objetivo a maximização da eficiência e a minimização da quantidade de calor que entra no ciclo. Esse programa da a alternativa uma diversidade de métodos para realizar a otimização, o método escolhido foi o NSGA2, devido ao fato desse atender funções multiobjetivas.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Para este artigo, primeiro será atribuído uma mesma condição inicial para todos os ciclos, no caso, pressão igual a 15,00 MPa e temperatura igual a 600 °C na admissão da turbina e pressão igual a 10 kPa no condensador. Nestas condições observamos para o ciclo simples, o ciclo com aquecimento, o ciclo com reaquecimento e o ciclo combinado eficiências de 43,04%, 44,96%, 46,27% e 48,37% respectivamente.

Também foi possível observar que o calor consumido variou em cada ciclo, sendo de 3375,63 kJ/kg, 3895,78 kJ/kg, 2774,70 kJ/kg e 2897,28 kJ/kg. Com esses dados, é possível afirmar que nas condições acima induzidas os ciclos com melhor comportamento são o ciclo rankine com regeneração e o ciclo rankine combinado. A escolha entre os dois deve-se levar em conta o que é mais importante, a economia do combustível ou o rendimento do ciclo, porém ambos apresentam um comportamento bem próximo.

Com intuito de avaliar o melhor comportamento de cada ciclo, esses serão otimizados dentro de seus parâmetros iniciais buscando uma melhor eficiência e um menor gasto de combustível, ou seja, um menor calor adicionado. Como este projeto ainda esta em fase inicial, a otimização será aplicada apenas ao ciclo rankine simples e os melhores resultados obtidos serão projetados para os demais ciclos e seus comportamentos serão avaliados e comparados.

Analisando os resultados obtidos com a ajuda do software, obtemos para o primeiro ciclo o seguinte gráfico:

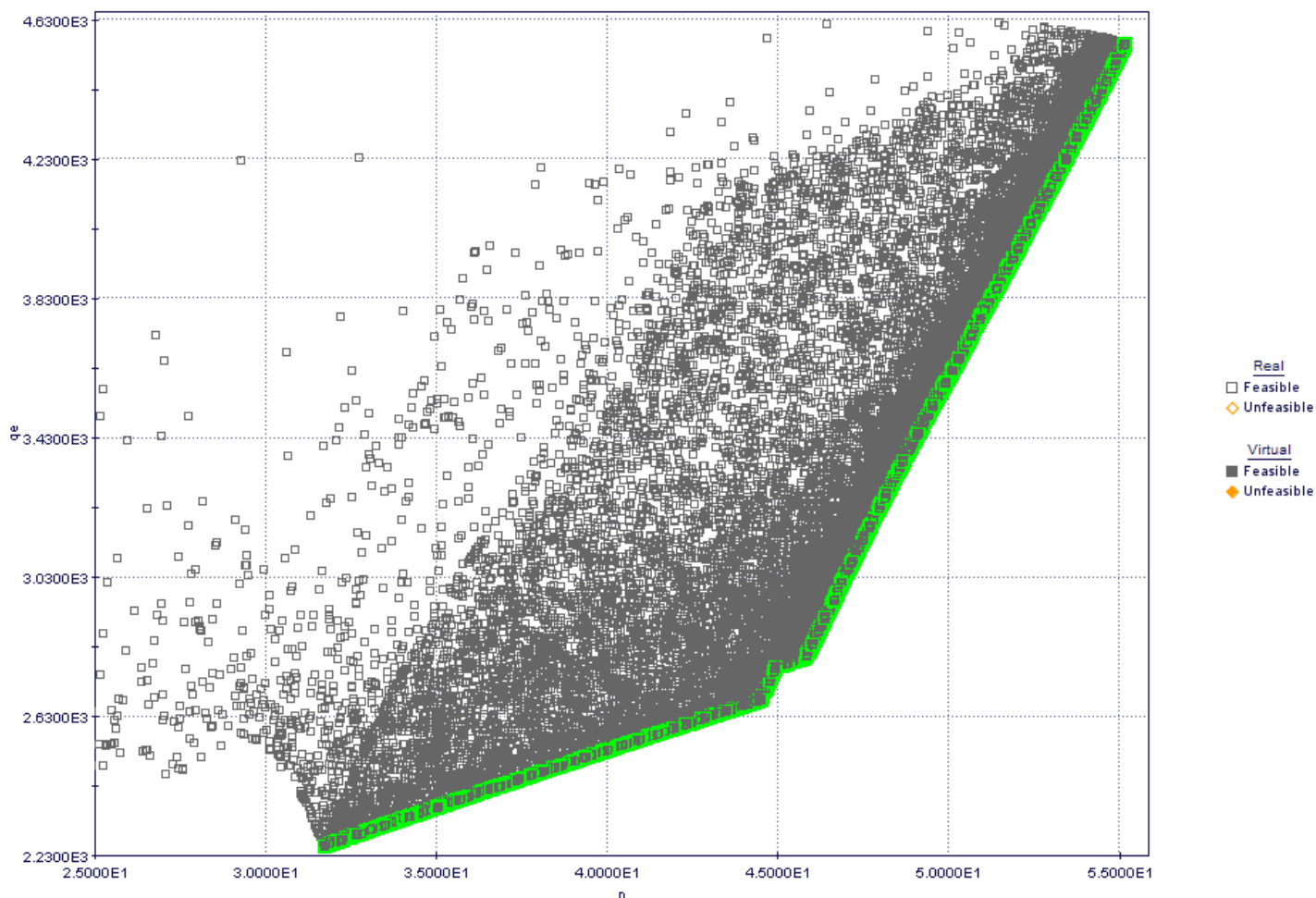


Figura 5. O gráfico acima representa calor adicionado x eficiência. A parte em verde demarca a fronteira de Pareto.

O gráfico presente na fig. (5) mostra a fronteira de Pareto, ou seja, uma série de resultados que serve de solução para o ciclo dentro das especificações. Porém, para aplicar como resultado nos demais ciclos, serão escolhidas duas situações específicas, a de maior eficiência e a de menor calor adicionado. Selecionando esses pontos nos gráficos acima, obtêm-se os seguintes valores mostrados na Tab. (1):

Tabela 1. Resultados obtidos por meio da otimização do ciclo rankine simples para melhor eficiência e menor calor adicionado.

Melhor eficiência				
$T_{\text{turb}} (^{\circ}\text{C})$	$P_{\text{turb}} (\text{MPa})$	$T_{\text{cond}} (\text{kPa})$	$\eta (\%)$	$q_e (\text{kJ/kg})$
1000,0000	19,9978	0,6120	55,1349	4562,4419
Menor calor adicionado				
$T_{\text{turb}} (^{\circ}\text{C})$	$P_{\text{turb}} (\text{MPa})$	$T_{\text{cond}} (\text{kPa})$	$\eta (\%)$	$q_e (\text{kJ/kg})$
350,0571	14,9994	100,0000	31,7036	2259,8532

Aplicando esses valores nos demais ciclos, os resultados são os seguintes:

Tabela 2. Resultados obtidos nos ciclos com reaquecimento, com regeneração e combinado por meio da otimização do ciclo simples.

Rankine com reaquecimento	
Melhor eficiência	
η (%)	q_e (kJ/kg)
48,26	4331,64
Menor calor adicionado	
η (%)	q_e (kJ/kg)
-	-
Rankine com regeneração	
Melhor eficiência	
η (%)	q_e (kJ/kg)
58,51	3775,71
Menor calor adicionado	
η (%)	q_e (kJ/kg)
-	-
Rankine com reaquecimento e regeneração	
Melhor eficiência	
η (%)	q_e (kJ/kg)
61,59	4190,59
Menor calor adicionado	
η (%)	q_e (kJ/kg)
-	-

Comparando os resultados de melhor eficiência da Tab. (2), novamente o ciclo combinado obteve o melhor resultado, porém com um gasto de combustível maior que o ciclo com apenas regeneração, que teve um rendimento ligeiramente menor. Já no caso do menor calor adicionado, não foi possível obter resultado com os dados otimizados para os outros ciclos. Isso ocorre porque, como diferença de pressão no condensador e na turbina é muito pequena, a pressão e a entropia dentro da turbina de alta caem muito, levando o fluido para um estado de líquido-vapor, o que não serve para o funcionamento correto da turbina.

6. CONCLUSÃO

Embora não foi possível obter todos os valores desejados, os resultados foram suficientes para mostrar com uma primeira análise que um ciclo apenas com reaquecimento não é muito mais eficiente nem econômico que um ciclo simples, sendo esse mais caro em função dos equipamentos extras e da manutenção.

Porém, um ciclo com regeneração apresenta uma economia substancial de combustível ao mesmo tempo que melhora seu rendimento. Enquanto um ciclo com reaquecimento e regeneração pode ter um aumento de rendimento ainda mais significativo do que os demais, porém com um gasto um pouco maior de combustíveis do que o ciclo com reaquecimento.

Foi visto ainda que, variando as condições de trabalho dos equipamentos, como os parâmetros pressão e temperatura e possível melhorar o rendimento sem modificar estrutura do ciclo. Como trabalhamos com uma otimização de multiobjetivos, a resposta foi dada pela fronteira de Pareto, ou seja, a resposta depende do quesito que se valoriza mais, podendo tender tanto para eficiência quanto para economia ou escolher um valor que se enquadre no meio termo.

Com isso, esse trabalho busca provar que, não é necessário fazer uma mudança radical nos equipamentos operantes para se obter uma melhor qualidade de vida, basta termos máquinas com ciclos eficientes operando dentro de circunstâncias ótimas para melhorarmos simultaneamente os problemas de excesso de poluição lançada na atmosfera e gastos excessivos de combustíveis não-renováveis.

7. REFERÊNCIAS

- Van Wylen, “Fundamentos da Termodinâmica”, 2003.
 Moran & Shapiro, “Fundamentals of Engineering Thermodynamics”, 2007.
 Revista SAE internacional, “Automotive Engineering International”, publicada em agosto de 2009.
 Aror, Jabir S. “Introduction to optimum design”. McGraw-Hill Inc., 1989.
 Kreher, Donald L. and Stinson, Douglas R., “Combinatorial Algorithms: Generation, Enumeration and Search”. CRC Press, 1999.

Jornal “Estadão”, publicado em 12 de janeiro de 2010.

<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=projeto-propoe-conversao-carros-comuns-carros-eletricos&id=>

<http://mercadoetico.terra.com.br/arquivo/dados-de-emissao-de-poluentes-divulgados-pelo-mma-confundem-consumidores/>

8. DIREITOS AUTORAIS

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

OPTIMIZATION OF A THERMODYNAMIC CYCLE TO SATISFY THE NEEDS OF A NEAR FUTURE

Helena Carvalho Mendes, [len_inh_a@hotmail.com](mailto:heninh_a@hotmail.com)¹

José Marcio do Amaral Vasconcellos, jmarcio@peno.cope.ufrj.br²

¹UFRJ, Ilha do Fundão, Cidade Universitária – Centro de Tecnologia - blocoI /sala 205 - LabECO,

²COPPE/UFRJ, Programa de engenharia naval e oceânica, caixa postal: 68508, 21941-972,

Abstract. *One of the major global concerns of the last years has been the question of non-renewable fuels. Much of the current source of power is still based on thermal cycles fed by sources of heat of burning fossil fuels. The aim of this paper is to optimize the thermal cycles, determining the minimum heat that must be delivered to the cycle through the burning of fuel to obtain the maximum liquid work and thermal efficiency as possible. We will review also the possibility of including regenerative and re-heaters in the cycle, separated or simultaneously, in order to obtain the best operating conditions. With the optimization of cycles, it will be possible increase efficiencies by targeting specific uses of each cycle and, at the same time, save fuel by reducing the pollution emitted by burning.*

Keywords: *Optimization; Cycles; Thermodynamics; Efficiency*