

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

REPOTENCIAÇÃO DE CENTRAIS A DIESEL EQUIPADAS COM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA: UMA REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

AUTORES:

Alexandre Persuhn Morawski, José Joaquim Santos, João Luiz Marcon Donatelli, Carla Cesar Martins, Leonardo Rodrigues de Araujo

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Espírito Santo, Instituto Federal do Espírito Santo

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

REPOTENCIAÇÃO DE CENTRAIS A DIESEL EQUIPADAS COM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA: UMA REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Abstract

Due the increase of fuel pricing and the growing environmental awareness, waste heat recovery techniques emerge as a very attractive alternative to increase the net power output and energy efficiency of thermal processes. Waste heat recovery (WHR) aims to use the heat that is normally discharged into the atmosphere by a thermal system, to turn it into a useful form of energy. Internal combustion engines are thermal machines with great opportunities for heat recovery since a large part of the fuel energy is wasted as heat due to thermal limitations. The current scenario of the Brazilian electricity system has led to the dispatch of thermoelectric plants originally planned to give security to the system and should not operate constantly. Therefore, for plants with this profile generating significant amounts of energy, it is essential to develop a study to better understand the situation of these plants in order to obtain the best energy efficiencies and higher net power output. In this work is carried out a review of the state of the art of repowering alternatives for thermoelectric plants equipped with internal combustion engines, through the recovery of waste heat. These information will eventually be used for a superstructure optimization proposition. This optimization will define which alternatives or combinations of alternatives are more feasible for the case study of a Brazilian thermoelectric plant equipped with diesel engine.

Introdução

De acordo com Santos (2005), os motores de combustão interna (MCI) são muito utilizados em pequenas centrais termelétricas acionando um gerador para gerar eletricidade.

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas com ótimas oportunidades de recuperação de resíduos térmicos. Aproximadamente um terço da energia do combustível é convertido em energia mecânica (TAHANI et al., 2013).

Segundo Domingues (2011), a energia restante é toda dissipada para o ambiente na forma de resíduo térmico através dos gases de escape, sistema de arrefecimento, sistema de lubrificação e por radiação e convecção do motor, o que explica a baixa eficiência dos MCI. Um fluxo de energia em um MCI pode ser visto na Figura 1.

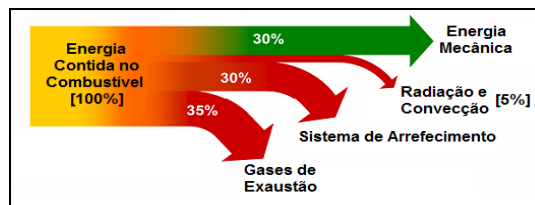


Figura 1 - Fluxo de Energia em um MCI
Fonte: Toom et al. (2008), apud Domingues (2011)

Cientistas e engenheiros têm feito muitas pesquisas bem sucedidas com intuito de melhorar a eficiência térmica de motores, incluindo turbo alimentação, tipos de misturas na combustão, etc. No entanto, entre todas as tecnologias de economia de energia estudadas, recuperação do resíduo térmico dos motores é considerada uma das técnicas mais efetivas (JADHAO; THOMBARE, 2013).

Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste em uma revisão bibliográfica das alternativas de repotenciação de termelétricas equipadas com motores de combustão interna, através da recuperação do calor perdido.

De acordo com Domingues (2011), a otimização dos MCI visando uma melhoria da eficiência global de conversão energética, exige a avaliação dos possíveis potenciais para recuperação dessa energia térmica desperdiçada. A Figura 2 indica as principais fontes de calor com potencial para aproveitamento térmico em um MCI turbo alimentado.

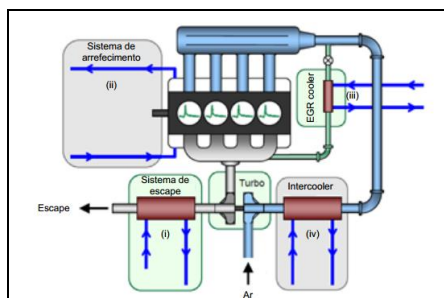


Figura 2 – Fontes de Calor em um MCI
Fonte: Barreiro e Santos (2010), apud Domingues (2011)

- i. Calor oriundo dos gases de exaustão;
- ii. Calor oriundo do óleo e da água de arrefecimento do motor;
- iii. Calor oriundo dos gases recirculados no motor, quando há essa configuração (EGR do inglês *Exhaust Gas Recirculation*);
- iv. Calor oriundo do arrefecimento do ar de admissão do motor, pós-compressão, comumente chamado de intercooler.

Entre as possíveis opções de recuperação de resíduo térmico de motores de combustão interna para aumento da potência se encontram: ciclo Rankine Orgânico, ciclo Kalina, ciclo de refrigeração por absorção (resfriar o ar de admissão) e ciclo combinado.

• Ciclo Rankine Orgânico (ORC)

Conceitualmente, o ciclo Rankine Orgânico é similar ao ciclo Rankine. No entanto, o fluido de trabalho é um composto orgânico caracterizado por uma temperatura de ebulição mais baixa que da água, o qual permite geração de potência através de fontes de calor de baixa temperatura. E além de possibilitar a recuperação de calor em fontes de baixas temperaturas, a tecnologia ORC permite uma interessante alternativa: um sistema ORC pode ser usado, com poucas modificações, em conjunto com várias fontes de calor de diferentes temperaturas (QUOILIN et al., 2013).

Os fluidos de trabalho são categorizados segundo a inclinação da linha de vapor saturado, em diagramas T-s. Fluidos úmidos com a inclinação positiva, fluidos secos com a inclinação negativa e fluidos isentrópicos com uma linha de vapor saturado aproximadamente vertical (Figura 3). Os fluidos úmidos geram gotículas nos estágios finais do expensor e requerem superaquecimento para evitar danos ao expensor. Fluidos secos são superaquecidos até mesmo depois da expansão. Para fluidos isentrópicos, o vapor saturado permanece nesta condição e gotículas não são formadas durante a expansão (ROY et al., 2010, apud TAHANI et al., 2013).

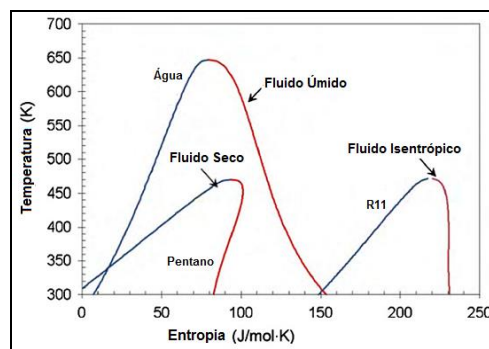


Figura 3 – Tipos de Fluidos de Trabalho
Fonte: Adaptado de Saidur et al. (2012)

Segundo Quoilin e outros (2013), fluidos isentrópicos e secos são preferíveis em ciclos ORC pelo fato não ser necessário superaquecer o fluido, procedimento comum nos ciclos Rankine a vapor. Outra diferença em relação ao ciclo Rankine a vapor é que a entalpia da vaporização é menor. Portanto, para igualar a potência térmica no evaporador, o fluido orgânico necessita de uma vazão mássica muito maior que para a água, levando a um maior consumo da bomba. No entanto, o ORC trabalha com uma pressão de evaporação bem menor que a de um ciclo Rankine a vapor, e pressões mais altas levam a maiores investimentos e maior complexidade. Na Tabela 1 são listadas as vantagens e desvantagens de utilizar o ORC para recuperação de resíduos térmicos.

Tabela 1 – Resumo das Características do Ciclo Rankine Orgânico

Vantagens	Desvantagens
Não há superaquecimento.	Custo maior do fluido de trabalho (em relação à água).
Planta e manutenção mais simples.	Consumo mais alta da bomba.
Níveis de pressão mais baixos.	Pior estabilidade do fluido (em relação à água).
Não necessita tratamento do fluido	Eficiência menor que o ciclo Rankine a vapor.

• Ciclo Kalina

Segundo Korobitsyn (1998), o ciclo Rankine tem uma séria desvantagem em aplicações de *bottoming* devido à temperatura de vaporização constante. O ciclo Kalina é basicamente um ciclo Rankine modificado, ou melhor, um ciclo por absorção invertido (VALDIMARSSON, 2003), que foi desenvolvido visando reduzir as irreversibilidades que uma substância pura como fluido de trabalho está sujeita. O ciclo Kalina utiliza a solução amônia-água como fluido de trabalho. A essência do ciclo Kalina aproveita a habilidade da solução amônia-água evaporar ou condensar a temperatura variável.

Na maioria das vezes a fonte de calor é limitada, ou seja, conforme há a troca térmica a temperatura da fonte de calor diminui. Os gases de exaustão de MCI não são exceção. Devido à temperatura de evaporação variável, o aumento da temperatura da mistura, em um trocador de calor contracorrente, segue mais próximo o perfil de temperatura da fonte de calor (MLCAK, 1996), como pode ser visto na Figura 4. Isto diminui as irreversibilidades da troca térmica e, portanto aumenta a eficiência termodinâmica do sistema (CHEN, 2011).

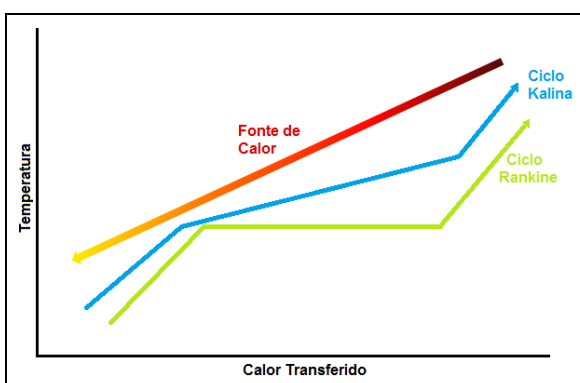


Figura 4 - Perfis de Temperatura para os Ciclos Kalina e Rankine

Segundo Korobitsyn (1998), um ciclo Kalina básico é composto de um gerador de vapor para recuperar o calor, uma turbina de vapor-amônia e um subsistema de destilação e condensação. Na Figura 5 é possível visualizar uma planta simples com ciclo Kalina. A mistura amônia-água tem uma temperatura significativamente maior na saída da turbina do que o vapor d'água. Isto tende a aumentar a temperatura média de rejeição de calor, e com isso diminuir a eficiência do ciclo se o fluido fosse diretamente para o condensador.

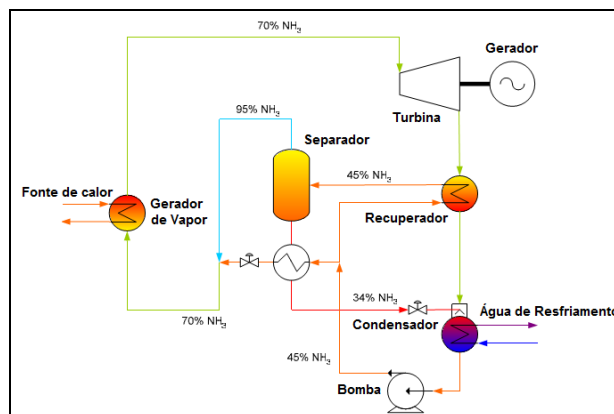


Figura 5 – Planta de Ciclo Kalina
Fonte: Adaptado de Mlcak (1996)

A solução é aproveitar esse calor residual para aquecer o fluido após a condensação, através do recuperador. (MLCAK, 1996). Na maioria dos casos o ciclo Kalina utiliza uma mistura rica em amônia na expansão, mas essa mistura possui uma temperatura de condensação muito baixa. Isto significa que seria necessário fornecer uma água de resfriamento a uma temperatura extremamente baixa, o que não é viável. Segundo Mclak (1996), adicionar à mistura uma solução pobre em amônia antes da condensação irá aumentar a temperatura de condensação e resolver o problema. Isto é feito através do separador como pode ser visto na Figura 5. Na Tabela 2 são listadas as vantagens e desvantagens de utilizar o ciclo Kalina para recuperação de resíduos térmicos.

Tabela 2 - Resumo das Características do Ciclo Kalina

Vantagens	Desvantagens
Maior eficiência que o ciclo Rankine.	Planta mais complexa em relação ao ORC.
Mudança de fase à temperatura variável.	Corrosividade da amônia com presença de impurezas.
Menor complexidade das plantas em relação ao ciclo Rankine.	Não é tão difundido quanto o ORC.
Adaptação do fluido de trabalho.	

• Ciclo de Refrigeração por Absorção

O princípio para o aumento da potência utilizando ciclo de refrigeração por absorção é o resfriamento do ar de admissão do motor. Resfriar o ar de admissão o torna mais denso. Com isso, uma maior quantidade de massa entrará na câmara de combustão, gerando assim uma maior potência de saída do motor, e por consequência uma maior eficiência.

Os principais componentes de um ciclo de refrigeração por absorção podem ser vistos na Figura 9. Segundo Moran e Shapiro (2011), o refrigerante circula pelo condensador, válvula de expansão e evaporador como um sistema de refrigeração por compressão de vapor. No entanto, o compressor é substituído pelo absorvedor, bomba e gerador. No absorvedor o vapor de refrigerante é absorvido pela substância secundária em uma reação exotérmica. A solução forte é então bombeada para o gerador de vapor, onde o vapor do refrigerante é extraído da solução. Isso envolve uma transferência de calor de uma fonte que esteja a uma temperatura relativamente alta. O calor rejeitado pelo motor é financeiramente atrativo para esse propósito. Os dois principais fluidos utilizados são Amônia-Água e Água-Brometo de Lítio

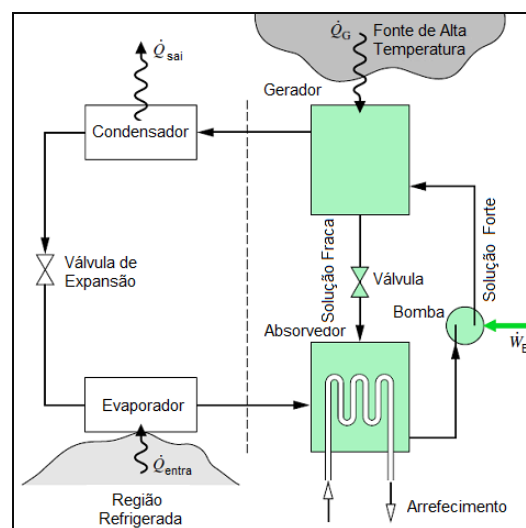


Figura 9 – Ciclo de Refrigeração por Absorção
Fonte: Adaptado de Moran e Shapiro (2011)

Exemplos de utilização em conjunto de MCI e ciclos de refrigeração por absorção (através de *chillers*) são muito comum na indústria, principalmente nas plantas de trigerção (produção de potência elétrica calor e capacidade de refrigeração). Além de através de vapor, é possível fornecer calor para os *chillers* diretamente pelos gases de exaustão (Figura 10), através de água quente ou através de ambos.

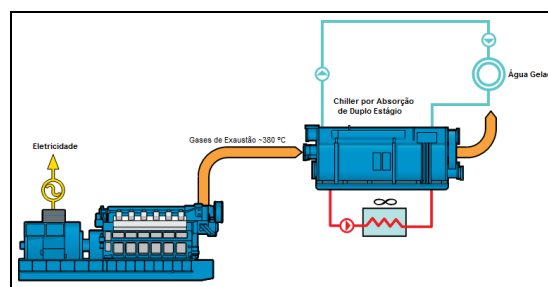


Figura 10 – Chiller Movido a Gases de Exaustão
Fonte: Adaptado de Catálogo da Wäertsilä

Na Tabela 3 são listadas as vantagens e desvantagens de utilizar o ciclo de refrigeração por absorção para recuperação de resíduos térmicos.

Tabela 3 - Resumo das Características do Ciclo de Refrigeração por Absorção

Vantagens	Desvantagens
Diminui a carga térmica nos componentes do motor.	Não é muito utilizado em motores quanto em turbinas a gás.
Diminui os danos ambientais.	
Tecnologia há muito tempo implantada na indústria.	Corrosividade da amônia com presença de impurezas (se utilizada).

Tabela 3 - Resumo das Características do Ciclo de Refrigeração por Absorção

Vantagens	Desvantagens
Aumento da potência sem necessidade de expensor.	
Substitui o sistema de arrefecimento.	

• Ciclos Combinados

De acordo com Moran e Shapiro (2011), um ciclo combinado acopla dois ciclos de potência de tal modo que a energia descarregada através do calor de um dos ciclos é usada parcialmente como energia fornecida a outro ciclo. A combinação mais comum é o Brayton/Rankine.

O ciclo Rankine a vapor é um ciclo de potência utilizado em inúmeras aplicações para gerar potência elétrica. Utiliza água como fluido de trabalho. É composto basicamente de quatro componentes: bomba, trocador de calor (caldeira), turbina/gerador e condensador, como pode ser visto na Figura 11 (DOMINGUES et al., 2013).

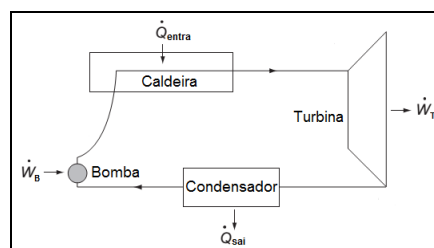


Figura 11 – Ciclo Rankine Simples

Fonte: Adaptado de Domingues et al. (2013)

Os gases de exaustão de motores Otto/Diesel possuem temperatura entre 300-500°C e, portanto, esse calor pode ser recuperado em uma caldeira recuperativa. No entanto, os MCI liberam uma vazão menor de gases de exaustão comparados com as turbinas a gás (Brayton). Porém segundo Korobitsyn (1998), para níveis de média temperatura o vapor d'água ainda é o fluido mais indicado devido suas propriedades. Gewald e outros (2012) modelaram um ciclo Rankine mais avançado para recuperar calor dos gases de exaustão de um motor Diesel (Figura 12). O calor dos gases de exaustão é recuperado em uma caldeira de recuperação. Com o calor de baixa temperatura dos gases é produzido vapor saturado para desaerar a água de alimentação.

O condensado é pré-aquecido pela água de arrefecimento do motor no pré-aquecedor I. A água pré-aquecida passa então pelo economizador, evaporador e superaquecedor, todos em contra corrente com os gases de exaustão, e o vapor superaquecido resultante é fornecido para a turbina que aciona o gerador para gerar potência elétrica. Na Tabela 4 são listadas as vantagens e desvantagens de utilizar o ciclo Rankine a vapor para recuperação de resíduos térmicos.

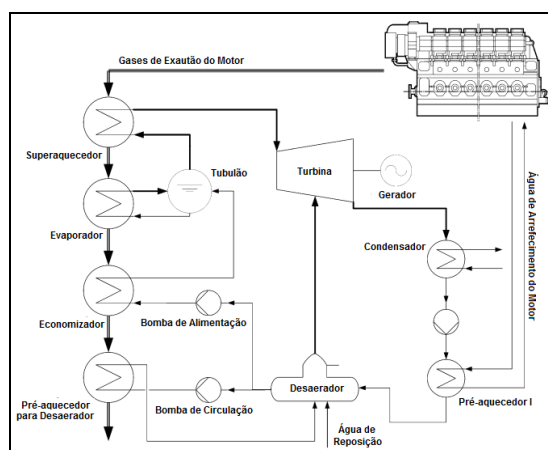


Figura 12 – Ciclo Combinado com MCI

Fonte: Modificado de Gewald et al. (2012)

Tabela 4 - Resumo das Características do Ciclo Rankine

Vantagens	Desvantagens
Fluido de trabalho barato e abundante.	Baixa eficiência para temperaturas baixas.
Fluido de trabalho sem dano ambiental.	Necessita tratamento do fluido de trabalho.
Tecnologia difundida e bem conhecida.	Necessita superaquecimento.
Baixo consumo da bomba (baixo BWR).	Grande irreversibilidade nas trocas térmicas.
Alta entalpia de vaporização do fluido.	

Resultados e Discussão

O despenho de projetos recentes de ORC é bastante interessante. Um sistema projetado pela BMW denominado *Turbosteamer* teve uma redução de consumo de combustível anunciada de 17%. Um projeto de OCR da Turboden utilizou os gases de exaustão de um motor biodiesel para aumentar a potência elétrica produzida em 10%. Dados divulgados pela GE mostraram o aumento da potência produzida com a utilização de ORC: Um motor de 1,5 MW com aumento de 140 kW e outro de 3 MW com aumento de 370 kW de potência produzida.

Apesar de não haver tantas plantas quanto o ciclo Rankine Orgânico, há várias aplicações bem sucedidas. Uma planta de demonstração em Canoga Park na Califórnia produz 6,5 MW de potência elétrica a partir de gases de exaustão de uma turbina a gás. Sumitomo Metals utiliza resíduos térmicos de uma planta siderúrgica em Tóquio para gerar 3,5 MW de potência elétrica. DG Khan utiliza gases e ar quente de uma fornalha para gerar 8,6 MW de potência elétrica em Khaipur no Paquistão. Na Islândia funciona a primeira planta geotérmica com ciclo Kalina. Ela gera 2 MW de eletricidade suprimindo 80% da demanda energética da cidade onde se encontra.

Talbi e Agnew (2002) estudaram a utilização de um ciclo de refrigeração por absorção para recuperar o calor dos gases de exaustão de um motor diesel e resfriar o ar de admissão do motor. Os resultados mostraram que resfriando o ar de admissão antes e após a compressão gerou um aumento de 8% da potência útil e ainda um potencial de condicionamento de ar. Kadunic e outros (2014) realizaram um estudo baseado no projeto Abgaswärmenutzung II da empresa Heat2Cool, no qual analisava o aumento da eficiência de um motor turbo alimentado resfriando o ar de admissão através de um sistema de refrigeração que utiliza os gases de exaustão. Entre os resultados mostrou-se um aumento da eficiência em 13% e uma redução no consumo de combustível de até 10,5%.

Uma aplicação de ciclo combinado em motores de automóveis híbridos foi estudada pela empresa japonesa Honda. O sistema projetado mostrou uma eficiência térmica máxima do ciclo Rankine de 13%. A 100 km/h, isso resulta em uma potência adicional de saída do ciclo de 2,5 kW (e representa um aumento da eficiência térmica do motor de 28,9% para 32,7% (QUOILIN et al., 2013).

Wärtsilä é uma empresa Finlandesa de soluções em ciclos de potência que utiliza ciclos combinados com MCI batizada de Flexicycle™. Devido ao fato de motores de combustão interna converterem mais energia do combustível em trabalho mecânico, eles têm maior eficiência de ciclo simples, com uma média perto de 50%. Os gases de exaustão de MCI tem temperatura em torno de 360°C, temperatura muito mais baixa do que a dos gases de uma turbina a gás. Devido às baixas temperaturas de gás de exaustão, as caldeiras recuperativas projetadas para plantas com MCI são muito mais simples, criando vapor em apenas um nível de pressão (aproximadamente 15 bar). A adição da turbina a vapor adiciona cerca de 20% à eficiência da usina Flexicycle. Exemplos de termoeletricas Flexicycle são: PlainsEnd nos Estados Unidos gerando 230 MW; Aliaga na Turquia gerando 270 MW; Quisqueya na República Dominicana gerando 430 MW.

Conclusões

Foram apresentadas alternativas para aproveitamento do calor rejeitado nos motores de combustão interna. Cada alternativa tem potencial para ser utilizada na recuperação de resíduo térmico, possuindo qualidades e desvantagens, sendo necessário um estudo mais profundo da aplicação desejada para determinar a melhor solução para o aproveitamento energético. Deve ser analisada também a possibilidade de combinar mais de uma alternativa visando maximizar a recuperação do calor.

Referências Bibliográficas

- CHEN, H. **Converting Low-Grade Heat into Electrical Power**. 2011. Disponível em: <<http://www.eng.usf.edu/~%20hchen4/index.htm>>. Acesso em 2014.
- DOMINGUES, A. **Avaliação do potencial de aproveitamento da energia contida nos gases de escape de automóveis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- DOMINGUES, A. et al. **Analysis of vehicle exhaust waste heat recovery potential using a Rankine cycle**. Energy, Volume 49, Pages 71-85, 2013.
- GEWALD, D. et al. **Integrated system approach for increase of engine combined cycle efficiency**. Energy Conversion and Management 60, pp. 36-44, 2012.
- JADHAO, J.; THOMBARE, D. **Review on Exhaust Gas Heat Recovery for I.C. Engine**. International Journal of Engineering and Innovative Technology. Volume 2, Issue 12, June 2013.
- KADUNIC, S. et al. **Increased gasoline engine efficiency due to charge air cooling through an exhaust heat driven cooling system**. MTZ, Volume 75, pp. 58 – 60, 2014.
- KOROBITSYN, M. **New and advanced energy conversion technologies. Analysis of cogeneration combined and integrated cycles**. Tese de Doutorado. Universidade de Twente, 1998.
- MLCÁK, H. **An Introduction to the Kalina Cycle**. PWR- Vol. 30, Proceedings of the International Joint Power Generation Conference, 1996.
- MORAN, M.; SHAPIRO H. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6ª Edição. Editora LTC, 2011.
- PAANU, T. et al. **Waste Heat Recovery: Bottoming Cycle Alternatives**. Proceedings of the University of Vaasa, Reports 175. Universidade de Vaasa, 2012.
- QUOILIN, S. et al. **Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 22, pp. 168–186, 2013.
- SAIDUR, R. et al. **Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2012.
- SANTOS, J.J.C.S. **Avaliação Exergoeconômica das Tecnologias para a Produção Combinada de Eletricidade e Água Dessalinizada**. Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2005.
- TAHANI, M. et al. **A Comprehensive Study on Waste Heat Recovery from Internal Combustion Engines Using Organic Rankine Cycle**. Thermal Science: Year 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 611-624.
- TALBI, M.; AGNEW, B. **Energy recovery from diesel engine exhaust gases for performance enhancement and air conditioning**. Applied Thermal Engineering, Volume 22, Issue 6, Pages 693-702, April 2002.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO. Biblioteca Central. **Normalização de referências: NBR 6023:2002**. Vitória, ES: A biblioteca, 2006.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO. Biblioteca Central. **Normalização e apresentação de trabalhos científicos e acadêmicos**. Vitória, ES: A biblioteca, 2006.
- VALDIMARSSON, P. **ORC and Kalina Analysis and Experience**. Lecture material, 2003.
- WÄRTISILÄ. Disponível em: <<http://www.wartsila.com/en/Home>>. Acesso em 2014.