

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS BOACNIN BEATO

**USO DE MOTORES STIRLING PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM PROPULSORES
NAVAIS: AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE**

UBERLÂNDIA

2018

LUCAS BOACNIN BEATO

**USO DE MOTORES STIRLING PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM PROPULSORES
NAVAIS: AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales.

UBERLÂNDIA

2018

RESUMO

A sociedade busca constantemente desenvolver formas de obter energia de forma mais eficiente com sustentabilidade e com menor emissão de poluentes. Deve-se encontrar maneiras de se reduzir o consumo de combustíveis fósseis, pois além de gerarem grande impacto ambiental contribuindo para o aquecimento global, são recursos limitados que estarão esgotados no futuro. Embora até o momento esteja sendo descartada, a energia térmica contida nos gases de combustão de motores poderia ser aproveitada quando usada como uma alternativa para alimentar um motor de Stirling. A potência gerada por este motor poderia ser usada para gerar eletricidade, por exemplo. Portanto, este trabalho abordou como isso seria possível, analisando os tipos de motores Stirling e qual seria a melhor opção para se ajustar à aplicação, bem como possíveis otimizações para melhora do desempenho. Finalmente, concluiu-se a potência obtida pelo motor Stirling é economicamente viável em uma dada aplicação. A aplicação escolhida para este trabalho foi em propulsores navais, pois para a utilização do motor Stirling é necessário grande espaço disponível, sendo assim possível sua instalação nestes. Ao final do trabalho será informado qual a economia de combustível conseguida, a diminuição de emissões de CO₂, o valor da economia financeira e do investimento necessário, atendendo aos requisitos de sustentabilidade.

Palavras-chave: Motor. Stirling. Naval. Regeneração. Energia. Recuperação. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Society is constantly seeking to develop ways to obtain energy more efficiently with sustainability and with less emission of pollutants. It must find ways to reduce the consumption of fossil fuels, because in addition to generating great environmental impact contributing to global warming, they are limited resources that will be exhausted in the future. Although so far being discarded, all the thermal energy contained in the combustion gases of the engines could be harnessed when used as an alternative to power a Stirling engine. The power generated by this motor could be used to generate electricity, for example. Therefore, this work addressed how it would be possible by analyzing the types of Stirling engines and what would be the best option to fit the application, as well as possible optimizations for performance improvement. Finally, it was concluded whether the power obtained by the Stirling engine is economically viable in a given application. The application chosen for this work was in marine propellers, because for the use of the Stirling engine large space is necessary, so it is possible to be installed in these. At the end of the work was informed about the fuel economy achieved, the reduction of CO₂ emissions, the amount of financial savings and the investment needed in accordance with sustainability criteria.

Key words: Engine. Stirling. Naval. Regeneration. Energy. Recovery. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Maiores produtores e reservas mundiais de petróleo em 2011.....	8
Figura 2 - Tripé da Sustentabilidade.....	11
Figura 3 - Seis elementos do processo de manufatura sustentável.....	12
Figura 4 - Motor original de Robert Stirling	15
Figura 5 - Diagrama P-v (a) e T-s (b) do ciclo Stirling	16
Figura 6 - Fases de Funcionamento do Motor Stirling.....	16
Figura 7 - Configuração Alfa do motor Stirling.....	18
Figura 8 - Configuração Beta do motor Stirling.....	18
Figura 9- Configuração Gama do motor Stirling	19
Figura 10 - Motor MAN de navio petroleiro.....	20
Figura 11 - Motor Stirling tipo Alfa fabricado por Karabulut.....	22
Figura 12 - Variação da potência em relação à pressão para diferentes temperaturas.	22
Figura 13- Protótipo de motor tipo Beta.....	23
Figura 14 - Unidade de microgeração da Stirling Engine com 1 kWe.....	24
Figura 15- Motor Caterpillar 3508B.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese de algumas vantagens e limitações da aplicação de indicadores de desenvolvimento sustentável.	13
Tabela 2 - Índices de Sustentabilidade Ambiental de diferentes países e suas	14
Tabela 3 - Especificações técnicas do motor tipo Beta fabricado por Karabulut.....	21
Tabela 4 - Características do protótipo tipo Beta	24
Tabela 5 - Alguns motores Stirling de diferentes fabricantes.	25
Tabela 6 - Características das tecnologias de cogeração.	26
Tabela 7 – Comparação de micro-cogeradores de diferentes fabricantes com motor Stirling.	26
Tabela 8 - Parâmetros do Motor Caterpillar 3508B	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 OBJETIVOS.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 SUSTENTABILIDADE.....	10
2.2 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	12
2.3 MOTORES STIRLING.....	14
2.4 VANTAGENS DO MOTOR STIRLING	17
2.5 DESVANTAGENS DO MOTOR STIRLING	17
2.6 CONFIGURAÇÕES DOS MOTORES STIRLING.....	17
2.7 POSSÍVEIS OTIMIZAÇÕES	19
2.8 APLICAÇÃO.....	20
3 MOTORES STIRLING DE MERCADO	21
3.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE MOTORES STIRLING.....	21
4 VIABILIDADE DO MOTOR STIRLING UTILIZADO EM APLICAÇÃO NAVAL ...	27
4.1 DISCUSSÕES FOCANDO A SUSTENTABILIDADE DE ACORDO COM O <i>TRIPLE BOTTOM LINE</i> ...	32
5 CONCLUSÕES.....	33
REFERÊNCIAS	34

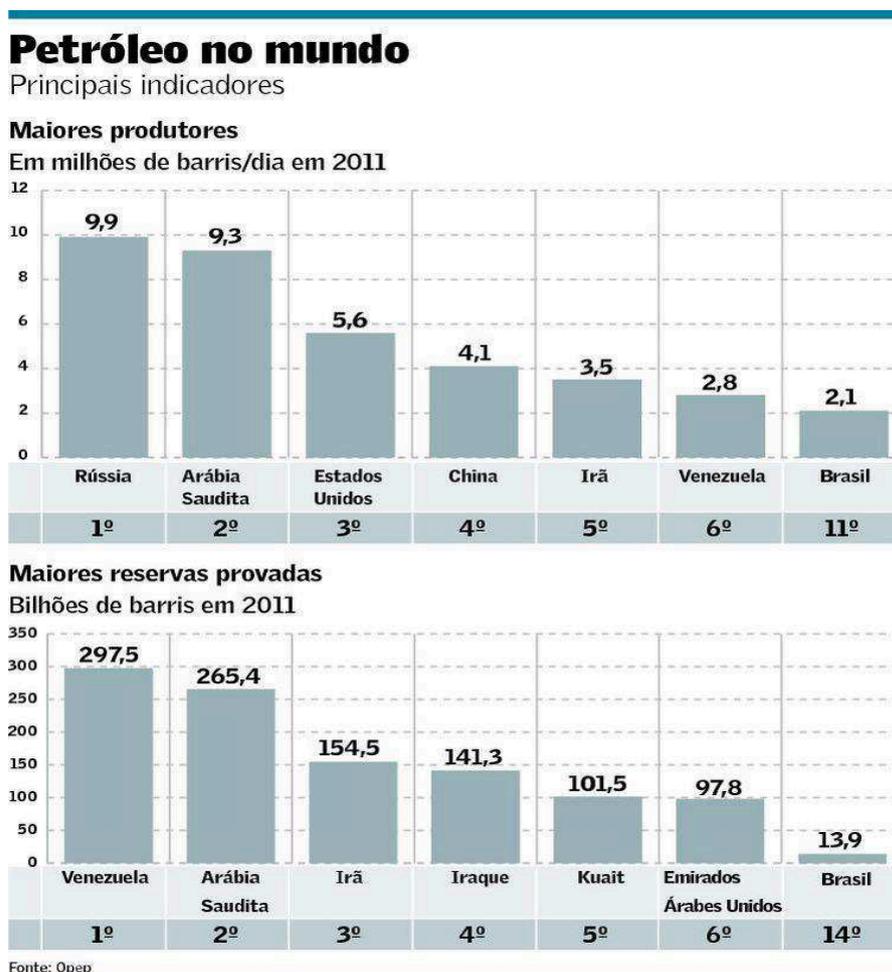
1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, a questão ambiental está em grande evidência. É necessário buscar energias alternativas, otimizar o desempenho e eficiência de processos, máquinas, motores para que estes consumam menos energia e emitam menos poluentes na atmosfera.

A busca pelo equilíbrio entre o crescimento econômico e a manutenção dos recursos naturais tem nos últimos anos fortalecido o paradigma do desenvolvimento sustentável, e para tal tem-se procurado estabelecer mecanismos capazes de subsidiar as ações da sociedade que conduzam na direção do desenvolvimento sustentável (COUTO, 2007).

Com relação as fontes não renováveis, têm-se expectativas de que as reservas de petróleo durem por aproximadamente 75 anos, as de gás natural por aproximadamente 100 anos e as de carvão por aproximadamente 200 anos (BARROS, 2005). Na Figura 1 têm-se os maiores produtores e reservas mundiais de petróleo em 2011.

Figura 1 - Maiores produtores e reservas mundiais de petróleo em 2011.



Fonte: OPEP (2011).

Pensando em reduzir o consumo de fontes não renováveis, pode-se utilizar o método da cogeração de energia. Pode definir-se o conceito de cogeração de energia, como sendo a produção termodinâmica sequencial de duas ou mais formas de energia a partir da mesma fonte de energia primária (EDUCOGEN, 2001).

Motores de combustão interna liberam uma grande quantidade de energia térmica nos gases de escape. Essa energia é jogada no ambiente, sendo totalmente desperdiçada. Para aproveitá-la, uma alternativa seria utilizar um motor Stirling, pois este necessita apenas de uma fonte de calor para gerar potência.

Este trabalho irá abordar os diferentes tipos de motores Stirling existentes, sua história e uma breve explicação do funcionamento de cada um deles. Através das vantagens e desvantagens de cada modelo, será investigado qual a melhor aplicação em que poderia ser utilizado este motor para a regeneração de energia.

1.1 Objetivos

Objetivo geral:

Este trabalho tem por objetivo realizar um projeto utilizando motor Stirling para a recuperação de energia em propulsores navais que irá reduzir o consumo de combustíveis fósseis, reduzindo assim as emissões de poluentes na atmosfera, gerando um bem ambiental, social e econômico, ou seja, com alto viés sustentável.

Objetivos específicos:

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Realizar um projeto com bom viés sustentável.
- Buscar uma maneira de se aproveitar a energia térmica provenientes dos gases de escape de motores de combustão interna utilizando motores Stirling.
- Será investigado quais são os tipos de motores Stirling existentes no mercado, qual a potência fornecida, dimensões e preço.
- Verificar sua viabilidade econômica e em qual aplicação seu uso seria adequado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sustentabilidade

Em seu sentido lógico sustentabilidade é a capacidade de se sustentar, de se manter.

Uma atividade sustentável é aquela que pode ser mantida para sempre. Em outras palavras: uma exploração de um recurso natural exercida de forma sustentável durará para sempre, não se esgotará nunca. Uma sociedade sustentável é aquela que não coloca em risco os elementos do meio ambiente. Desenvolvimento sustentável é aquele que melhora a qualidade da vida do homem na Terra ao mesmo tempo em que respeita a capacidade de produção dos ecossistemas nos quais vivemos. (MIKHAILOVA, 2004).

A preocupação com o desenvolvimento sustentável representa a possibilidade de garantir mudanças sociopolíticas que não comprometam os sistemas ecológicos e sociais que sustentam as comunidades. A complexidade desse processo de transformação de um planeta, não apenas crescentemente ameaçado, mas também diretamente afetado pelos riscos socioambientais e seus danos, é cada vez mais notória. (JACOBI, 2003).

A noção de sustentabilidade implica, portanto, uma inter-relação necessária de justiça social, qualidade de vida, equilíbrio ambiental e a ruptura com o atual padrão de desenvolvimento (JACOBI, 1997).

Estudos sobre a mudança climática na última década demandam uma maior conscientização sobre complexas questões que podem afetar negativamente o progresso humano. Sobre o século passado, a industrialização alimentou o rápido crescimento de muitos países; hoje parece haver um consenso crescente para um reexame fundamental de como as indústrias devem desenvolver produtos para os consumidores. (SELIGER, 2011).

O chamado **tripé da sustentabilidade** (do Inglês, *Triple Bottom Line*), (Figura 2), é baseado em três princípios: o social, o ambiental e o econômico. Esses três fatores precisam ser integrados para que a sustentabilidade de fato aconteça. Sem eles, a sustentabilidade não se sustenta. (TODA MATÉRIA, 2018).

- **Social:** Engloba as pessoas e suas condições de vida, como educação, saúde, violência, lazer, dentre outros aspectos.
- **Ambiental:** Refere-se aos recursos naturais do planeta e a forma como são utilizados pela sociedade, comunidades ou empresas.
- **Econômico:** Relacionado com a produção, distribuição e consumo de bens e serviços. A economia deve considerar a questão social e ambiental.

Figura 2 - Tripé da Sustentabilidade



Fonte: Toda Matéria (2018).

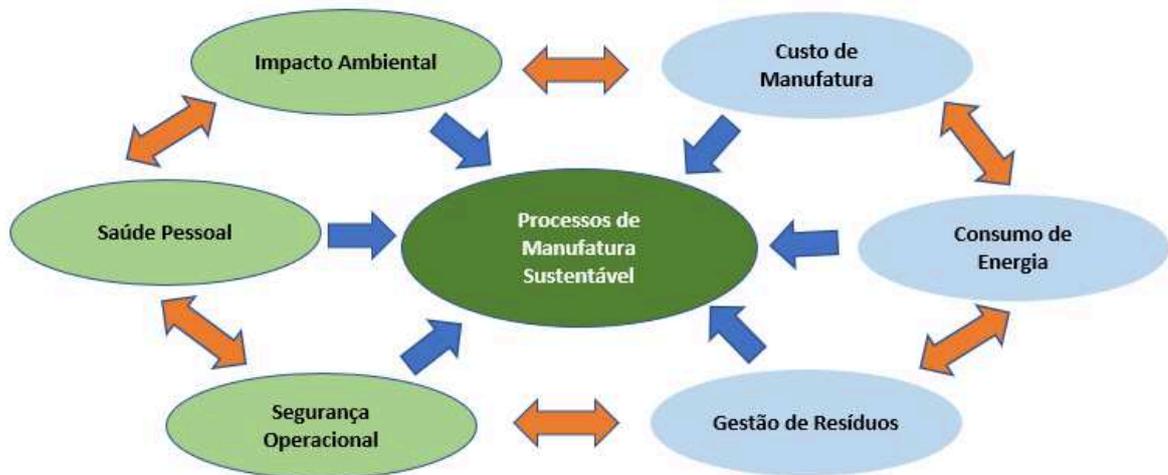
A produção sustentável tem como objetivo desenvolver produtos que usam menos recursos, causam menos desperdício e poluição e contribuir para o progresso social em todo o mundo. Tem sido amplamente considerado como a próxima revolução industrial e tem sido apontado como inevitável para toda a produção, dados os recursos finitos da Terra. (SELIGER, 2011).

Segundo Seliger (2011), uma atividade sustentável envolve os seguintes aspectos:

- Produto, considerando design, durabilidade, qualidade e embalagem.
- Emprego, relacionado à saúde, segurança, proteção, satisfação e oportunidades de renda dos envolvidos em produção.
- Econômico, incluindo investimento de valor agregado em tecnologia e ética sustentável envolvendo a produção.
- Sociedade, incluindo desenvolvimento comunitário e impactos no balanço social resultante da implementação de práticas sustentáveis.
- Ambiente, incluindo o impacto da produção nos resíduos, emissões, som e outros componentes ambientais.
- Infraestrutura de suporte, incluindo telecomunicações e facilidade de transporte.

Na Figura 3, têm-se os seis elementos do processo de manufatura sustentável.

Figura 3 - Seis elementos do processo de manufatura sustentável.



Fonte: Adaptado de Seliger (2011).

2.2 Indicadores de Sustentabilidade

O primeiro grande passo global no âmbito do desenvolvimento sustentável foi a realização da Conferência de Estocolmo em 1972 (UN - *Conference on the Human Environment*), onde se percebeu uma necessidade de reaprender a conviver com o planeta. Porém, o desenvolvimento sustentável passou a ser a questão principal de política ambiental, somente, a partir da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92). (MIKHAILOVA, 2004).

A Organização das Nações Unidas, através do relatório “Nosso Futuro Comum”, publicado pela Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento em 1987, elaborou o seguinte conceito. “*Desenvolvimento sustentável é aquele que busca as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias necessidades.*” (MIKHAILOVA, 2004).

Os indicadores de sustentabilidade são ferramentas utilizadas para auxiliar no monitoramento da operacionalização do desenvolvimento sustentável, sendo a sua principal função fornecer informações sobre o estado das diversas dimensões (ambientais, econômicas, socioeconômicas, culturais, institucionais, etc.) que compõem o desenvolvimento sustentável do sistema na sociedade (CARVALHO, J. et al., 2011).

Observa-se que um dos maiores desafios enfrentados na quantificação ou qualificação da sustentabilidade consiste na elaboração de metodologias adequadas que permitam avaliar a sustentabilidade de realidades locais, regionais ou nacionais, posto existirem diferentes

características e peculiaridades inerentes aos aspectos sociais, econômicos, ambientais, culturais e institucionais. (KEMERICH, 2014).

Uma grande dificuldade dos indicadores é que não existe a possibilidade de medir a sustentabilidade de uma determinada escala considerando apenas um indicador que se refira a apenas um aspecto, pois a sustentabilidade é determinada por um conjunto de fatores (econômicos, sociais, ambientais, culturais e institucionais) e todos devem ser contemplados simultaneamente. Dessa forma, ao se avaliar a sustentabilidade deve-se usar sempre um conjunto de indicadores (MARZALL; ALMEIDA, 1999).

Abaixo na Tabela 1, têm-se vantagens e limitações da aplicação de indicadores de desenvolvimento sustentável.

Tabela 1 - Síntese de algumas vantagens e limitações da aplicação de indicadores de desenvolvimento sustentável.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> -Avaliação dos níveis de desenvolvimento sustentável. -Capacidade de sintetizar a informação de carácter técnico/científico; -Identificação das variáveis-chave do sistema; -Facilidade de transmitir a informação; -Bom instrumento de apoio à decisão e aos processos de gestão ambiental; -Sublinhar a existência de tendências; -Possibilidade de comparação com padrões e/ou metas pré-definidas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Inexistência de informação base; -Dificuldades na definição de expressões matemáticas que melhor traduzam os parâmetros selecionados; -Perda de informação nos processos de agregação dos dados; -Diferentes critérios na definição dos limites de variação do índice em relação às imposições estabelecidas; -Ausência de critérios robustos para seleção de alguns indicadores; -Dificuldades na aplicação em determinadas áreas como o ordenamento do território e a paisagem.

Fonte: DGA (2000).

O Índice Piloto de Sustentabilidade Ambiental surgiu em 2000 como um projeto piloto de se testar a praticabilidade, os benefícios e aventar a possibilidade da criação de um projeto mais ambicioso. O projeto de 2000 gerou um ESI para 56 economias mundiais através de 64 variáveis. O Índice de Sustentabilidade Ambiental 2001 englobou 122 países através de 67 variáveis. A diferença básica do trabalho deste último ano foi a atribuição de pesos para os indicadores proporcionando, assim, resultados um pouco mais justos para países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento.

ESI–2002 trata-se do primeiro "ranking" global do gênero, cobrindo 142 países. Na ponderação do ESI, entram 20 indicadores cruzados, obtidos pela mixagem de 68 variáveis separadas. O índice ESI vai de 0 a 100. Quanto mais limpo ou menos sujo um país, maior a nota ponderada. A avaliação leva em conta condições do presente, situações do passado e inclinações do futuro. E não apenas do ecossistema natural. Igualmente do ambiente econômico, cultural, político e institucional nos tratos da sustentabilidade ambiental. Pode-se ver na Tabela 2 como as posições entre países se modificaram (por exemplo, Brasil e EUA), enquanto que as posições de alguns países desenvolvidos pioraram extremamente (Reino Unido e Japão). (MIKHAILOVA, 2004).

Tabela 2 - Índices de Sustentabilidade Ambiental de diferentes países e suas posições (ranking) em 2001 e 2002.

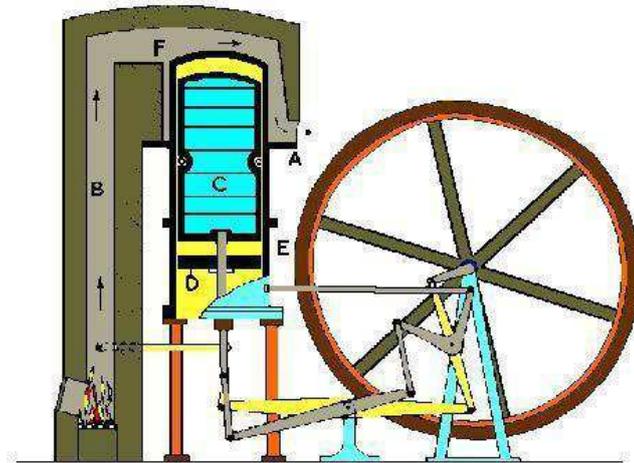
Pais	ESI 2001	Ranking 2001 (de 1 a 122)	ESI 2002	Ranking 2002 (de 1 a 142)
Finlândia	80,5	1	73,9	1
Noruega	78,2	2	73	2
Canadá	78,1	3	70,6	4
Suíça	74,6	5	66,5	5
Costa Rica	58,8	26	63,2	9
Argentina	62,5	19	61,5	15
Austrália	70,7	7	60,3	16
Brasil	57,4	28	59,6	20
EUA	66,1	11	53,2	45
Rússia		33	49,1	72
África do Sul	51,3	45	48,7	77
Japão	60,6	22	48,6	78
Reino Unido	64,1	16	46,1	91
China	37,6	108	38,5	129
Saudí Arábia		121	25,7	141
Kuwait		116	23,9	142

Fonte: *Environmental Sustainability Index 2002*. World Economic Forum. Annual Meeting. Yale e Columbia University, 2003.

2.3 Motores Stirling

O motor Stirling (Figura 4) foi criado em 1816 por Robert Stirling, na Escócia. Estes motores operam segundo um ciclo termodinâmico regenerativo, onde o fluido de trabalho é comprimido e expandido alternadamente entre uma fonte quente e uma fonte fria, cujo diferencial de temperatura permite uma troca efetiva de calor (Costa, 2013).

Figura 4 - Motor original de Robert Stirling



Fonte: Barros (2005).

A movimentação do êmbolo se dá em função da compressão e expansão do gás presente no interior do cilindro formando um ciclo fechado. Os gases mais utilizados são Hélio ou Hidrogênio.

O ciclo Stirling Ideal, mostrado na Figura 5, é reversível, com um elevado rendimento térmico, onde:

3-4 = Compressão Isotérmica

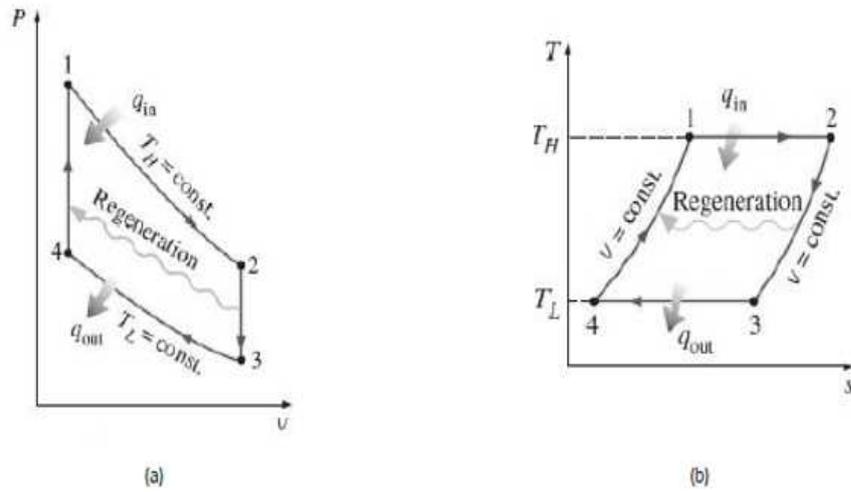
4-1 = Calor é transferido a volume constante

1-2 = Expansão Isotérmica

2-3 = Calor é rejeitado a volume constante.

Porém, no processo real, a expansão e compressão não são perfeitamente isotérmicas, o que leva numa redução do trabalho produzido.

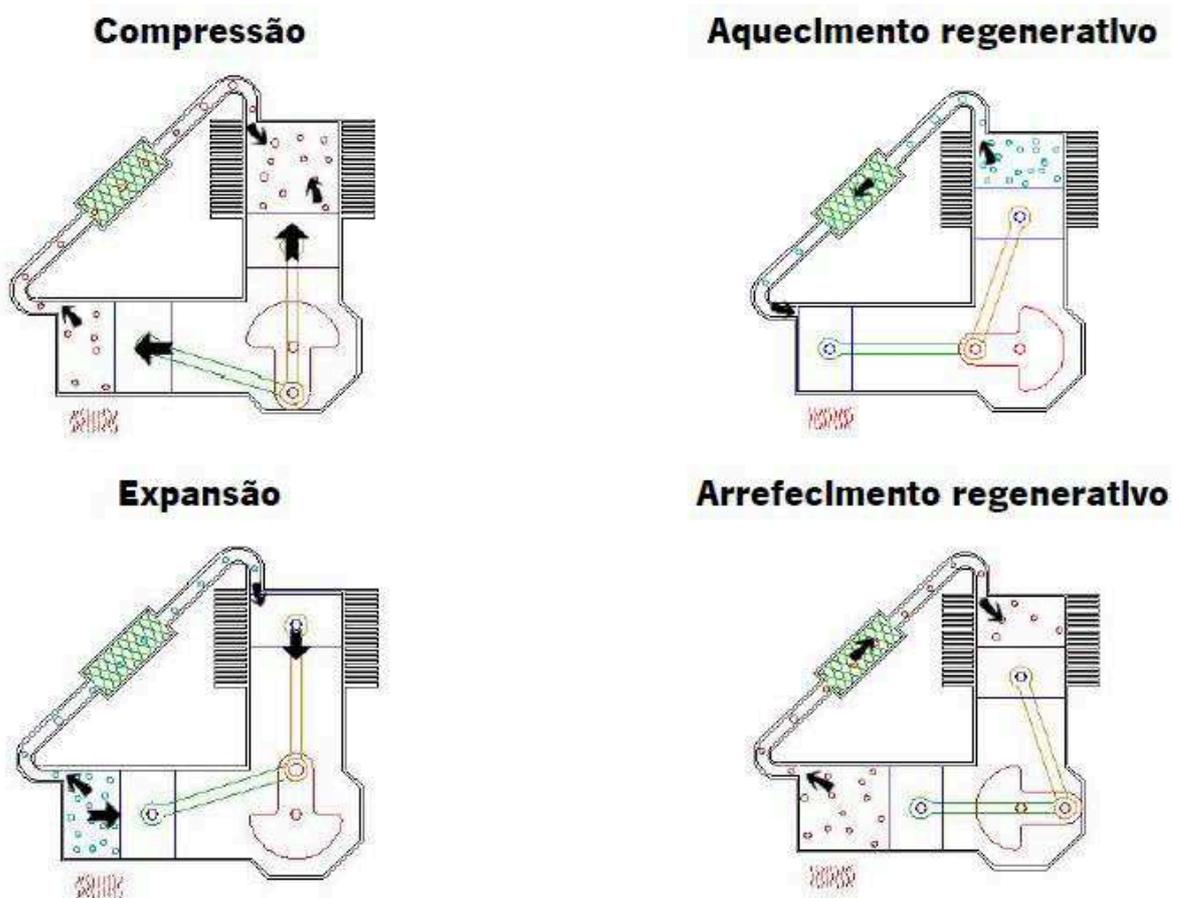
Figura 5 - Diagrama P-v (a) e T-s (b) do ciclo Stirling



Fonte: Cengel e Boles (2006).

Na figura 6, têm-se as fases de funcionamento do motor Stirling.

Figura 6 - Fases de Funcionamento do Motor Stirling



Fonte: Keveney (2011).

2.4 Vantagens do motor Stirling

Estes motores apresentam elevado rendimento térmico, boa eficiência energética, são silenciosos, com baixa vibração devido à combustão ser contínua e externa, podem operar utilizando qualquer fonte de calor e combustível, têm pouca necessidade de manutenção e baixo desgaste interno.

2.5 Desvantagens do motor Stirling

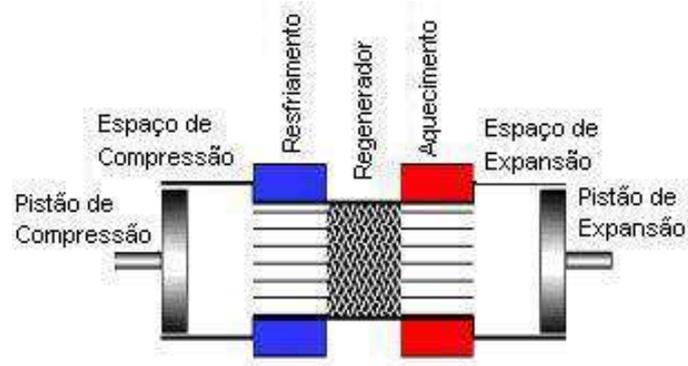
A tecnologia Stirling ainda está limitada a poucas aplicações devido ao seu baixo rendimento elétrico, dificuldades em controlar a potência devido aos diferentes permutadores de calor que compõem o motor, como o regenerador, permutador de aquecimento e o de arrefecimento, elevado custo específico e a necessidade de aquecer o motor no arranque (Roselli et al., 2011). São motores com custo elevado, apresentam dificuldade em se vedar o fluido de trabalho e isso acarreta em um atrito elevado, dificuldade em iniciar e variar sua rotação rapidamente, produção em pequena escala, manutenção cara, tecnologia pouco difundida e alta relação peso potência.

2.6 Configurações dos Motores Stirling

Os motores Stirling basicamente se dividem em três tipos: tipo Alfa, Beta e Gama.

- Tipo Alfa: É a versão mais simples, constituída de dois pistões, um de expansão e outro de compressão, separados em dois cilindros que são unidos por trocadores de calor, como visto na figura 7. Sua grande vantagem é a facilidade de construção, porém há a necessidade de vedação que impeça a saída do fluido.

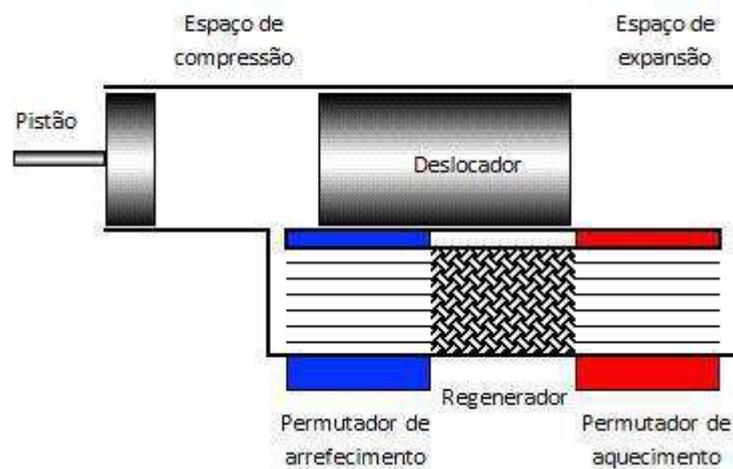
Figura 7 - Configuração Alfa do motor Stirling



Fonte: Mello (2001).

- Tipo Beta: Configuração clássica, onde o pistão de trabalho e o pistão de deslocamento (deslocador) estão alinhados e presentes dentro do mesmo cilindro (Figura 8). É um sistema mais complexo, de difícil construção, mas nessa configuração é possível obter uma maior taxa de compressão e maior potência específica em relação as versões Alfa e Gama.

Figura 8 - Configuração Beta do motor Stirling

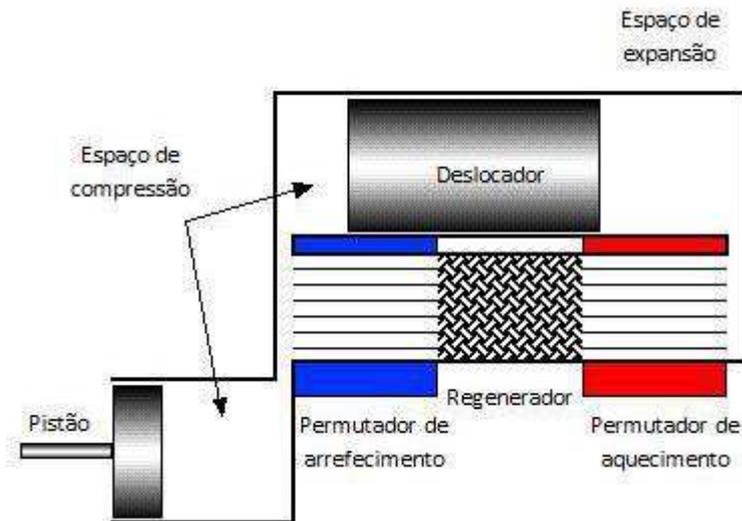


Fonte: Mello (2001).

- Tipo Gama: Basicamente é um motor do tipo Beta, porém o pistão de trabalho e pistão de deslocamento se encontram em cilindros separados (Figura 9).

Apresenta uma taxa de compressão e potência menores que a versão Beta, porém seu mecanismo é mais simples.

Figura 9- Configuração Gama do motor Stirling



Fonte: Mello (2001).

2.7 Possíveis otimizações

Como visto anteriormente, motores Stirling possuem algumas desvantagens e com isso é necessário desenvolver e encontrar maneiras para tentar atenuá-las ou solucioná-las.

Tentativas por aumentar seu desempenho têm envolvido mudanças no gás de trabalho, aumento de pressão, aumento da diferença de temperaturas de operação, aumento do rendimento dos trocadores de calor e a melhora dos mecanismos de transmissão de potência (KARABULUT, 2011). A maior parte das tentativas envolve mudanças na geometria do motor.

É necessário desenvolver tecnologia para se conseguir uma boa vedação do fluido de trabalho sem que isso acarrete num grande aumento de atrito, buscar soluções para melhorar a relação peso potência do motor, pois isso limita-o em algumas aplicações e a partir do momento em que motores Stirling tiverem uma produção em larga escala consequentemente haverá uma redução nos custos de manutenção e no seu valor de mercado.

2.8 Aplicação

Observando as características dos motores Stirling, suas vantagens e desvantagens, é possível encontrar uma aplicação em que seu uso possa ser interessante.

Inicialmente, a ideia deste trabalho seria utilizá-lo para reaproveitamento dos gases de escape de veículos, como carros e caminhões. O conceito em aproveitar a energia térmica expulsa pelo motor de combustão interna desses veículos para o funcionamento do motor Stirling era o que alimentava essa ideia. Porém, fazendo um melhor estudo dos motores Stirling, percebeu-se que isso seria difícil de ser implantado.

Analisando as desvantagens dos motores Stirling, foi visto que um grande empecilho para essa aplicação é a alta relação peso/potência desses motores. Ou seja, para que seja gerada uma potência significativa é necessário um grande motor Stirling.

Em carros e caminhões, o espaço disponível para instalação do motor é muito pequeno, e o peso adicional seria prejudicial. Um motor Stirling pequeno, compacto, não iria fornecer uma potência significativa e não geraria a economia esperada, sendo assim uma aplicação inviável.

Partindo deste pensamento, a aplicação em um navio de grande porte poderia ser possível, pois nele há espaço disponível para a instalação do motor Stirling e o acréscimo de peso seria desprezível.

Sendo assim, o trabalho será averiguar se a com o uso de algum motor Stirling existente no mercado será possível e viável em aplicação naval.

Figura 10 - Motor MAN de navio petroleiro.



Fonte: Motores... (2013).

3 MOTORES STIRLING DE MERCADO

3.1 Especificações Técnicas de Motores Stirling

Este capítulo destina-se em demonstrar, com base em especificações técnicas de diversos motores Stirling já fabricados, qual potência pode-se obter com eles e com isso poder verificar sua viabilidade em uma possível aplicação naval, que será abordada no capítulo 4, utilizando os gases de escape dos motores Diesel como fonte de calor para a cogeração de energia utilizando motores Stirling. O uso do motor Stirling irá aproveitar a energia térmica contida nos gases de escape, o que nada impede de se utilizar mutuamente um turbocompressor para aproveitar a energia cinética desses gases.

Abaixo na Tabela 3, têm-se as especificações técnicas de um motor Stirling tipo Beta fabricado por Karabulut.

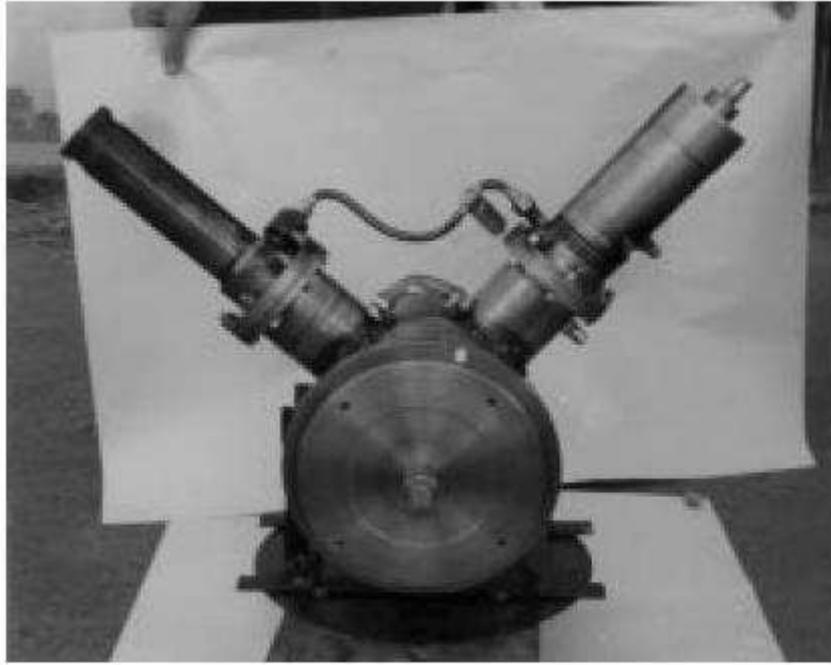
Tabela 3 - Especificações técnicas do motor tipo Beta fabricado por Karabulut.

Parâmetros	Especificação
Tipo do Motor	Beta
Pistão de Potência	Diâmetro x Curso (mm) 70 x 30 Volume (cc) 230
Deslocador	Diâmetro x Curso (mm) 69 x 79 Volume (cc) 295
Fluido de Trabalho	Ar
Sistema de Refrigeração	Água
Razão de Compressão	1,65
Área total de transferência de calor do cilindro deslocador (cm ²)	1705
Potência Máxima	51,93 W (a 453 rpm)

Fonte: Karabulut (1998)

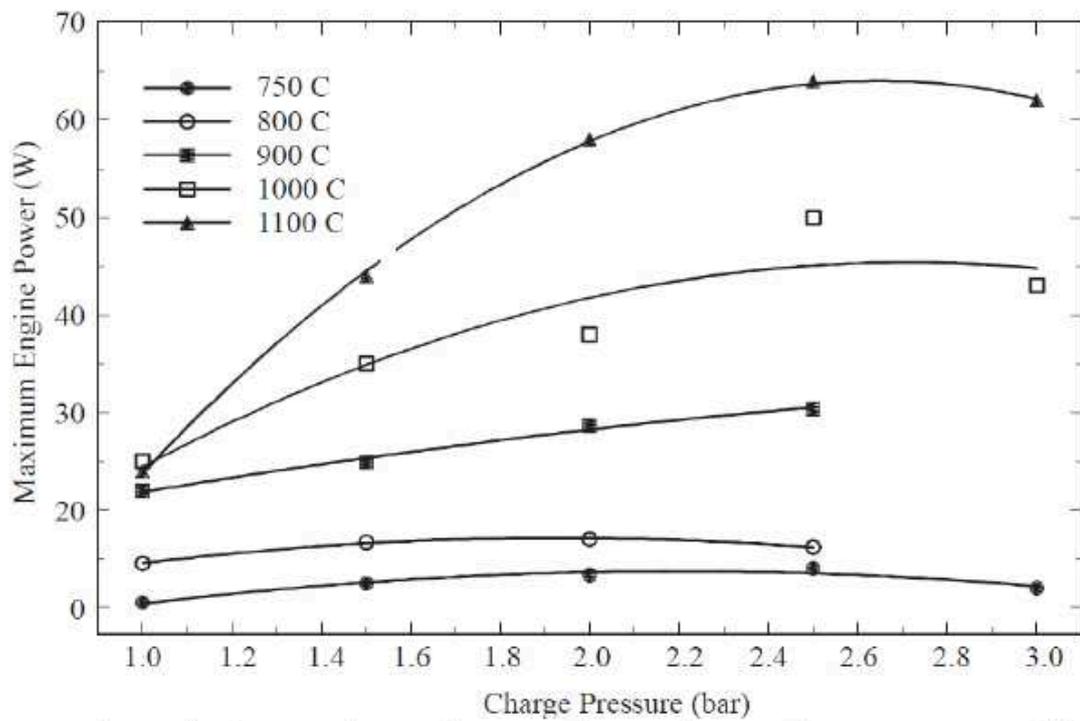
Na Figura 11, tem-se um motor Stirling tipo Alfa fabricado por Karabulut. Sua potência máxima de saída foi de 65 W, obtida a uma pressão de 2,5 bar e 1100 °C conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 11 - Motor Stirling tipo Alfa fabricado por Karabulut



Fonte: Karabulut (1998)

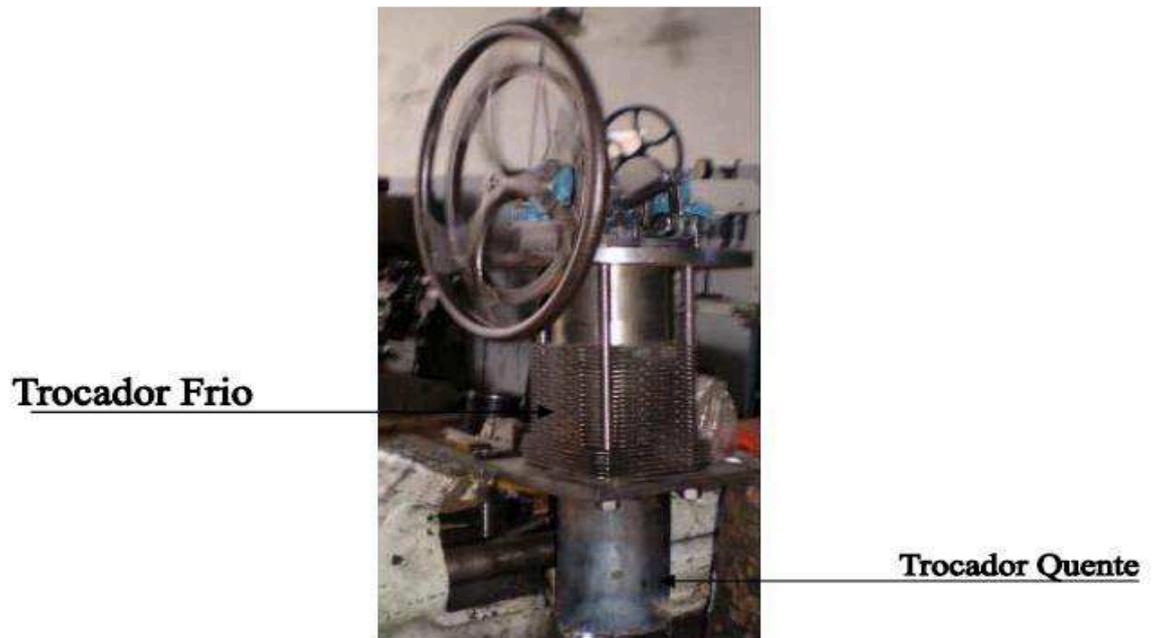
Figura 12 - Variação da potência em relação à pressão para diferentes temperaturas.



Fonte: Karabulut (1998).

Manrique et al. (2009) fabricaram um protótipo de motor tipo Beta que gerou uma potência de 30 W, numa rotação de 180 rpm utilizando fonte quente com temperatura de 400 °C. Seguem nas figuras 13 e Tabela 4, a representação do protótipo e suas características, respectivamente.

Figura 13- Protótipo de motor tipo Beta



Fonte: Manrique et al. (2009)

Tabela 4 - Características do protótipo tipo Beta

Características do protótipo	
Configuração do motor	Beta
Fluido de trabalho	Ar
Volume de deslocamento	392 cm ³
Sistema de refrigeração	Ar
Pressão de trabalho	Atmosférica
Curso do pistão	5 cm
Diâmetro do pistão	10 cm
Velocidade nominal	180 rpm
Máxima potência	30 W

Fonte: Manrique (2009).

Na figura 14 abaixo, tem-se uma unidade de microgeração da Stirling Engine que usa motor tipo Alfa, dimensões 563 x 491 x 838 mm e 1 kWe de potência.

Figura 14 - Unidade de microgeração da Stirling Engine com 1 kWe.



Fonte: Costa (2013).

Na Tabela 5, tem-se um comparativo de diferentes fabricantes de motores Stirling.

Define-se Eficiência Elétrica como sendo a relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização.

Tabela 5 - Alguns motores Stirling de diferentes fabricantes.

Empresa (país)	Potência (KWe)	Eficiência Elétrica (%)	Situação
STM/4-120 (USA)	32	30	Comercial 2002
WHISPERGEN (Nova Zelândia)	0.5	10	Comercial
JOANNEUM (Austrália)	3 30	24 ?	Em desenvolvimento
DANSTOKER/DTU (Dinamarca)	36 150	22* 26*	Comercial Em desenvolvimento
KOCKUMS (Suécia)	8 40 118		Em desenvolvimento.
SOLO (Alemanha)	2-9	27	Comercial 2002

*Eficiência global (motor Stirling e forno de combustão de biomassa).

Fonte: Wilke e Lora (2004)

Na Tabela 6, têm-se algumas características de diversas tecnologias utilizadas em cogeração.

Tabela 6 - Características das tecnologias de cogeração.

	Turbina a vapor	Combustão interna		Turbinas de combustão	Micro-turbina	Motor Stirling	Células de combustível
		Motor Diesel	Motor a gasolina				
Gama de potências	20 kW - 500 MW	5 kW – 20 MW	3 kW – 6 MW	250 kW – 50 MW	15 kW – 300 kW	1 kW – 1.5 MW	5 kW – 2 MW
Combustível	Qualquer	Fuelóleo Diesel	Gasolina, biogás, propano	Gás natural, propano, biogás	Gás natural, diesel, gasolina	Qualquer	Hidrogénio ou hidrocarbonetos
Rendimento elétrico (%)	7 - 20	35 – 45	25 – 43	25 - 42	15 – 30	40	37 - 60
Rendimento global (%)	60 - 80	65 - 90	70 – 92	65 - 87	60 – 85	65 – 85	85 - 90
Custo médio investimento (Euros/kW)	750 - 1500	255-750	600 - 1199	338 - 712	675 - 1124	974 - 1499	1874 – 2624

Fonte: Wu e Wang (2006).

Pode-se observar na Tabela 7 que os três micro-cogeneradores de diferentes fabricantes apresentam baixo rendimento elétrico.

Tabela 7 – Comparação de micro-cogeneradores de diferentes fabricantes com motor Stirling.

Fabricantes de sistemas de micro-cogeração	Viessmann Werke Vitotwin 300 W	Whispergen	Enerlyt
Motor Stirling	Beta	Alfa	Alfa
Combustível	Gás natural	Gás natural	Gás natural (biogás)
Potência do Combustível (kW)	7	9.1	5
Potência elétrica (kW)	1	1	1
Potência térmica (kW)	5.7	7.5	3.5
Rendimento elétrico (%)	14.3	11	20

Fonte: Costa (2013).

4 VIABILIDADE DO MOTOR STIRLING UTILIZADO EM APLICAÇÃO NAVAL

De acordo com os capítulos 2 e 3 observou-se que devido as características dos motores Stirling (alta relação peso/potência), deve-se buscar uma aplicação em que o acréscimo de peso não seja prejudicial e haja espaço disponível para a instalação do motor Stirling. Com isso, este capítulo irá abordar uma possível aplicação que seria a cogeração de energia em aplicação naval e verificar sua viabilidade.

O sistema de propulsão em navios provém de motores Diesel. Parte do calor rejeitado pelos motores, em grandes navios, costuma ser reaproveitado por caldeiras de gases de escape.

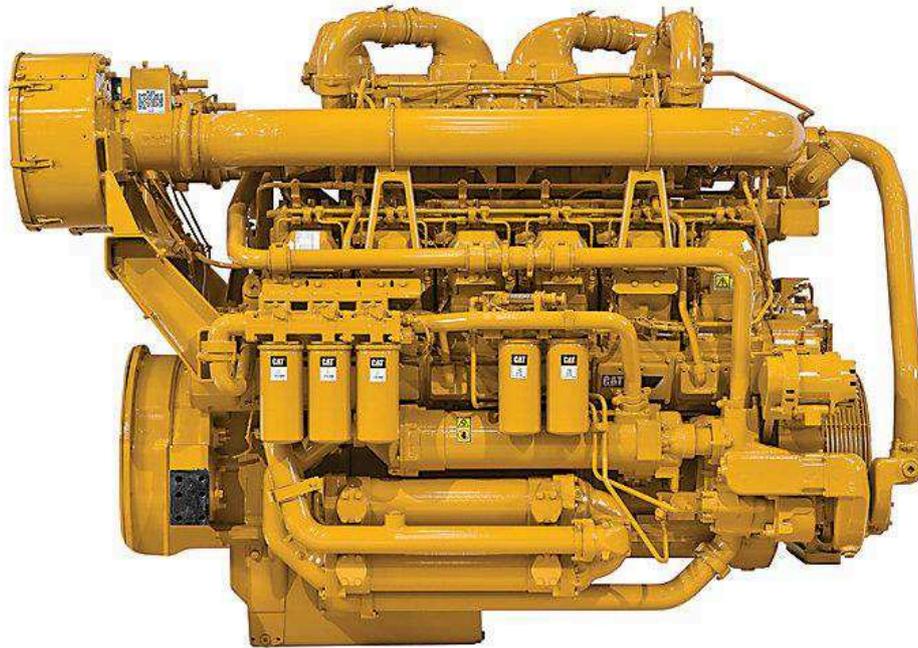
Outra maneira de se aproveitar esse calor seria utilizando um motor Stirling para gerar alguma potência.

Como relatado anteriormente, motores Stirling apresentam uma grande desvantagem que é a alta relação Peso/Potência. Portanto, neste trabalho, será descartada a possibilidade de aplicação em pequenas embarcações.

Um estudo de caso realizado por (Ramesh e Kalyani, 2012) servirá como referência para averiguar a viabilidade de se utilizar um motor Stirling para recuperar energia em navios.

Neste estudo, foi considerada a energia gerada pelos gases de escape de um motor marinho Caterpillar 3508B, que apresenta 578 kW (785 cv) de potência (figura 15).

Figura 15- Motor Caterpillar 3508B.



Fonte: Caterpillar (2018)

Abaixo na Tabela 8, seguem mais dados a respeito deste motor.

Tabela 8 - Parâmetros do Motor Caterpillar 3508B

Parâmetros	Especificação
Rotação do Motor	1200 rpm
Potência do Motor	578 kW
Consumo Específico	202,5 g/bkwh
Temperatura Exaustão	335,1 °C
Vazão Gás de Escape	113,6 m ³ /min
Poder Calorífico Diesel Naval	39240 kJ/kg (aprox)
Calor Específico Gás de Escape	1 kJ/kgK

Fonte: Ramesh e Kalyani (2012).

Com estes dados, serão realizados os cálculos que irão dizer quanto de energia pode ser recuperada, quantos litros de diesel serão economizados e quantas toneladas de CO₂ deixarão de ser emitidos por ano.

A Quantidade de Energia recuperada em [kJ/s] é dada por:

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde:

$$m = \text{Fluxo de massa [kg/s]}$$

$$Cp = \text{Calor específico [kJ/kg.K]}$$

$$\Delta T = (T_{\text{exhaust}} - \gamma) - (T'') \quad (2)$$

$$\gamma = \text{Coeficiente de Perda} = 20^\circ\text{C}$$

$$T'' = \text{Temperatura de condensação} + 10^\circ\text{C}$$

Com os dados fornecidos, pode-se obter:

$$m = 1,098 \text{ [kg/s]}$$

$$\Delta T = (335,1 - 20) - (170) = 145^\circ\text{C}$$

Então:

$$Q = 1,098 \cdot 1 \cdot 145$$

$$Q = 159,5 \text{ kJ/s}$$

Assumindo o máximo de energia recuperada, desconsiderando perdas, pelo ciclo Carnot tem-se:

$$\eta_c = 1 - \left(\frac{T_C}{T_H} \right) \quad (3)$$

Onde:

$$\eta_c = \text{Rendimento do Ciclo Carnot}$$

$$T_C = \text{Temperatura fria} = T_{\text{amb}} + \gamma$$

$$T_H = \text{Temperatura quente} = T_{\text{exhaust}} - \gamma$$

Portanto:

$$\eta_c = 1 - \left(\frac{65 + 273}{315 + 273} \right)$$

$$\eta_c = 0,425$$

Aplicando o rendimento η_c em Q , tem-se a Energia Recuperada:

$$E_R = Q \cdot \eta_c \quad (4)$$

$$E_R = 159,5 \cdot 0,425$$

$$E_R = 67,8 \text{ kW}$$

Mas na prática, deve-se considerar várias perdas e assim poder encontrar a Potência gerada pelo motor Stirling.

$$P_S = \eta_H \eta_M \eta_C \eta_S \quad (5)$$

Onde:

$\eta_H =$ *Rendimento da Transferência de Calor (0,85-0,95)*

$\eta_M =$ *Rendimento Mecânico (0,75 – 0,90)*

$\eta_C =$ *Coefficiente Stirling (0,55 – 0,88)*

$\eta_S =$ *Eficiência do Ciclo Stirling = (0,33)*

Portanto:

$$P_S = 0,85 \cdot 0,75 \cdot 0,55 \cdot 0,33 \cdot 159,5$$

$$P_S = 18,45 \text{ kW}$$

Com a potência gerada pelo motor Stirling, pode-se calcular qual seria a economia de combustível.

A Economia de Combustível é dada por:

$$\text{Economia de Combustível} = P_S \cdot SFC \cdot \left(\frac{24}{1000}\right) \quad (6)$$

$$\text{Economia de Combustível} = 18,45 \cdot 202,5 \cdot \left(\frac{24}{1000}\right)$$

$$\text{Economia de Combustível} = 89,7 \text{ kg/dia}$$

Convertendo para litros, utilizando a fórmula de Densidade, tem-se:

$$D = \frac{m}{V} \quad (7)$$

$$V = \frac{m}{D} \quad (8)$$

Onde:

$V = \text{Volume [l]}$

$m = \text{Massa [kg]}$

$D = \text{Densidade do Diesel [kg/l]}$

Com isso:

$$V = \frac{89,7}{0,853}$$

$$V = 105 \text{ l}$$

Tem-se uma economia diária de 105 litros o que representa 3,2% referente ao consumo normal (3281 litros). Considerando funcionamento o ano todo, obtém-se uma economia de 38325 l de Diesel (para um maior refinamento, deve-se considerar a quantidade de horas exata de funcionamento do navio e suas respectivas paradas para manutenções). Adotando um preço médio de R\$ 3,00 por litro, serão economizados R\$ 114.975,00 ao ano.

Além da economia financeira, tem-se uma diminuição no impacto ambiental, uma vez que serão reduzidas as emissões de CO₂ e outros poluentes na atmosfera.

Tem-se um fator de emissão médio de 2,6 kg de CO₂ para cada litro de Diesel queimado, portanto deixarão de ser emitidos 99,6 Toneladas de CO₂ ao ano.

Pelos cálculos, a potência fornecida pelo motor Stirling é de 18,45 kW. Isso sendo um modelo teórico. Há no mercado motores Stirling que fornecem potência semelhante a encontrada no modelo teórico, um deles é o Motor Stirling para Recuperação de Calor da marca RICHUAN.

O sistema do motor RICHUAN utiliza o calor de gases de escape com temperaturas entre 300 e 700°C e outras fontes de calor (Óleo de refrigeração e metal líquido) para aquecer o gás de trabalho nitrogênio e assim a potência é gerada pelo motor Stirling.

A potência gerada parte de 20 kW podendo chegar a 100 kW.

O custo do motor RICHUAN está orçado em U\$40.000,00.

Utilizando a conversão de U\$1,00 como sendo R\$3,50 tem-se que o motor custa R\$ 140.000,00 mais impostos de importação (60% sobre o valor do produto) e frete (R\$ 5.800,00 por contêiner) obtém-se um valor final de R\$230.000,00.

Como a economia utilizando este motor pode chegar a R\$115.000,00 por ano, tem-se que em 2 anos o valor investido será recuperado (desconsiderando os custos de manutenção).

4.1 Discussões Focando a Sustentabilidade de Acordo com o *Triple Bottom Line*

Como visto, utilizar o motor Stirling para a recuperação de energia em propulsores navais é uma alternativa altamente sustentável, uma vez que abrange os três aspectos do *Triple Bottom Line*, trazendo diversos benefícios ambientais, sociais e econômicos.

Sobre o lado econômico, foi visto que é possível atingir uma economia financeira de R\$115.000,00 por ano, sendo que o investimento inicial será recuperado em apenas 2 anos.

No aspecto ambiental, deixarão de ser emitidos 9,6 toneladas de CO₂ ao ano, reduzindo assim danos como o efeito estufa. Além disso, serão poupados 38325 litros de combustível fóssil (diesel) ao ano, contribuindo para uma maior duração deste recurso para as gerações futuras.

Pelo lado social, tem-se que a menor emissão de poluentes (originados pela queima do combustível) na atmosfera irá melhorar a qualidade de vida das pessoas, uma vez que um ar poluído pode causar diversos problemas à saúde, correlacionando com o aspecto ambiental.

5 CONCLUSÕES

Com este trabalho, concluiu-se que o projeto apresenta bom viés sustentável, abrangendo os 3 aspectos do *Triple Bottom Line*. Com ele foram conquistados benefícios ambientais, sociais e econômicos.

Pôde-se entender quais são os tipos de motor Stirling existentes (Alfa, Beta e Gama), observou-se suas particularidades, vantagens, desvantagens e possíveis otimizações. Foram analisados diversos tipos de motores Stirling existentes no mercado e concluiu-se que para aplicação em automóveis, ou qualquer meio em que não há muito espaço disponível, motores Stirling para recuperar a energia térmica proveniente dos gases de escape podem não ser interessantes, uma vez que estes apresentam alta relação peso/potência, sendo necessário um grande espaço disponível para sua instalação e que seu peso não interfira no funcionamento do equipamento.

Em aplicações onde há espaço disponível, como em grandes navios, chegou-se em uma economia de combustível considerável (38325 litros por ano), além de uma menor emissão de poluentes o que torna o projeto viável e sustentável.

Utilizando o motor Stirling RICHUAN, como exemplo, o valor investido pode ser recuperado em 2 anos de uso (desconsiderando custos de manutenção).

REFERÊNCIAS

AMORA, D. Frete marítimo de contêiner. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 20 fev. 2017. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2017/02/1860404-frete-maritimo-de-conteiner-tem-preco-divulgado-na-internet.shtml>> Acesso em: 16 Jun. 2018.

BARROS, R. W. **Avaliação teórica e experimental do motor Stirling modelo Solo161 operando com diferentes combustíveis**. Itajubá, 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

BRITO, G. de P. **Otimização numérico/computacional aplicada ao comportamento dinâmico de um mecanismo tipo cursor, biela e manivela**: estudo de caso para implementação de um motor Stirling em sua configuração beta. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

CARVALHO, J. R. M. de; CURI, W. W. F; CARVALHO, E. K. M. de A, CURI, R. C. **Proposta e validação de indicadores hidroambientais para bacias hidrográficas**: estudo de caso na sub-bacia do alto curso do Rio Paraíba, PB. Revista Sociedade e Natureza, Uberlândia, v. 23, n. 2, ago. 2011.

CATERPILLAR. **Industrial 3508B**. 2018. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines-lesser-regulated-non-regulated/18397966.html> Acesso em: 14 abr. 2018.

COMO importar da China. 2016. Disponível em: <<http://comoimportardachina.com/2013/como-calculas-taxas-de-importacao-da-china/>> Acesso em: 16 jun. 2018.

COSTA, J. M. S. **Metodologia simplificada para a análise termoeconômica de sistemas de cogeração com motor Stirling**, 2013. 123 f. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, 2013.

COUTO, O. F. V. **Geração de um índice de sustentabilidade ambiental para bacias hidrográficas em áreas urbanas através do emprego de técnicas integradas de geoprocessamento**. 2007. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

CRUZ, V. G. **Desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo gama**. 2012. 69 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Disponível em: <<http://tede.biblioteca.ufpb.br:8080/handle/tede/5341>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

DIREÇÃO GERAL DO AMBIENTE – DGA, 2000. **Proposta para um sistema de indicadores de desenvolvimento sustentável**. Amadora, Portugal, 2000.

EDUCOGEN. **The European Educational Tool on Cogeneration.** 2001.

ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY INDEX 2002. **World Economic Forum.** *Revista Economia e Desenvolvimento*, n° 16, 2004. 4 1. **Annual Meeting.** Yale e Columbia University, 2003.

JACOBI, P. **Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade.** Cadernos de Pesquisa, n. 118, mar. 2003

JACOBI, P. **Meio ambiente urbano e sustentabilidade: alguns elementos para a reflexão.** 1997. In: CAVALCANTI, C. (org.). Meio ambiente, desenvolvimento sustentável e políticas públicas. São Paulo: Cortez, 1997. p.384-390.

KARABULUT, H. **Dynamic analysis of a free piston Stirling engine working with closed and open thermodynamic cycles.** *Renewable Energy*, 36-1704-1709, 2011.

KARABULUT, H.; SERDAR, H.; KOKA, A. **Manufacturing and testing of a V-Type Stirling engine.** Turk J Engin Environ Sci, v. 24, p. 71-80. 2000.

KARABULUT, H.; YUCESU, H. S.; AKSOY, C. C. **An experimental study on the development of a b-type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources.** Applied Energy, v.80, p. 310-332. 1998.

KEMERICH, P. D. C. **Indicadores de sustentabilidade ambiental: métodos e aplicações.** 2014. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria. Revista Monografias Ambientais - REMOA e-ISSN 2236 1308 - V. 13, N. 5. 2014: Edição Especial LPMA/UFSM, p. 3723-3736.

MANRIQUE, S.; FRANCO, J.; NUNEZ, V. **Construcción de un prototipo stirling de baja potencia para su empleo en ámbitos rurales a partir de fuentes de energía renovable.** Avances En Energias Renovables Y Medio Ambiente; Salta Capital; vol. 13 p. 27 – 36. 2009.

MARZAL, K; ALMEIDA, J. **Indicadores de sustentabilidade para agroecossistemas: Estado da arte, limites e potencialidades de uma nova ferramenta para avaliar o desenvolvimento sustentável.** Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, v.17, n.1, p.41-59, jan./abr. 2000.

MEDINA, J. R. V. **Análise teórica do motor Stirling Amazon visando otimização do desempenho.** 2012. 216 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

MELLERAS, E., BERNARDINI, P. A. N; GUESSER, W. L. **Coletores de Escape em Nodular SiMo.** 2003. Disponível em: <www.tupy.com.br/downloads/guesser/coletores_escape_nodular_simo.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2018.

MELLO, M. G. **Biomassa Energia dos Trópicos em Minas Gerais.**Belo Horizonte: LabMídia/FAFICH, 2001.

MIKHAILOVA, I. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática. **Revista Economia e Desenvolvimento**, nº 16, 2004.

MOTORES MAN. 2013. Disponível em:

<http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=237105> Acesso em: 14 abr. 2018.

MOURÃO, P. J. F. **Recuperação da entalpia dos gases de cogeração doméstica**. 2012. 59 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2012.

OPEP. 2011. Disponível em: <<https://jornalggn.com.br/blog/luisnassif/cenarios-do-petroleo-brasil-e-o-mundo>> Acesso em: 26 jul. 2018.

RAMESH, U; E KALYANI, T. Improving the efficiency of marine power plant using Stirling engine in waste heat recovery systems. **International Journal of Innovative Research and Development**, [s.l.], v. 1, n. 10, p. 449–466. Dec. 2012. Disponível em: <<http://www.ijird.com/index.php/ijird/article/view/34969>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

ROSELLI, C., SASSO, M., SIBILIO, S., & TZSCHEUTSCHLER, P. (2011). **Experimental analysis of microgenerators based on different prime movers**. *Energy and Buildings*. 2011. 43(4), 796–804.

SELIGER, G. et al. **Advances in Sustainable Manufacturing**. Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing. New York City: Springer, 2011.

SILVA, J. C.; HOFFMANN. R. O uso do ciclo termodinâmico Stirling no aproveitamento de fontes térmicas. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 17., 2002, Passo Fundo. [Anais...] Passo Fundo: [s.n.], 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267861904_O_USO_DO_CICLO_STIRLING_NO_APROVEITAMENTO_DE_FONTES_TERMICAS>. Acesso em: 16 jun. 2018.

STIRLING engine generator for heat recovery. 2018. Disponível em: <https://www.alibaba.com/product-detail/25-100KW-Stirling-Engine-Generator-for_60680744509.html?spm=a2700.7724838.2017115.102.2fea67ec6vGpg2> Acesso em: 16 jun. 2018.

TODA MATÉRIA. **Tripé da sustentabilidade**. 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/sustentabilidade/>> Acesso em: 26 jul. 2018.

WILKE, H.; LORA, E. E. S. Desenvolvimento de um módulo combustor biomassa-motor stirling aplicado a sistemas de geração isolada e baseados em gerador de indução. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DE ENERGIA, 2004, Campinas. [Anais...]. Campinas: [s.n.], 2004. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100046&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 16 jun. 2018.

WU, D. W., & WANG, R. Z. **Combined cooling, heating and power: A review**. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32(5-6), 459–495. 2006.