

**CENTRO PAULA SOUZA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**FATEC SANTO ANDRÉ**  
**Tecnologia em Eletrônica Automotiva**

**Felipe Vidal**

**Manoel Lima**

Santo André  
2014

**CENTRO PAULA SOUZA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**FATEC SANTO ANDRÉ**  
**Tecnologia em Eletrônica Automotiva**

**Felipe Vidal**

**Manoel Lima**

**Funcionamento e Aplicação de Motores Stirling em Veículos Híbridos**

Trabalho de Conclusão de Curso entregue à Fatec Santo André como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Eletrônica Automotiva.

Orientador: Prof. MSc. Cleber Willian Gomes  
Coorientador: Prof. Wagner Massarope

Santo André  
2014

Vidal, Felipe Salvador  
Funcionamento e Aplicação de Motores Stirling em  
Veículos Híbridos / Felipe Salvador Vidal, Manoel Neves Lima,  
orientação Cleber Willian Gomes. – Santo André: 2014.  
37.: il.; 30 cm.

Inclui bibliografias: f.36-37  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação)– FATEC  
Santo André.

1. Motores Stirling. 2. Veículos Híbridos. 3.  
Aproveitamento de energia térmica. I. Lima, Manoel Neves. II.  
Gomes, Cleber Willian (orient.). III. FATEC Santo André. IV.  
Funcionamento e Aplicação de Motores Stirling em Veículos  
Híbridos.

*Faculdade de Tecnologia de Santo André*

LISTA DE PRESENÇA  
SANTO ANDRÉ, 11 DE JUNHO DE 2014

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA "Funcionamento e Aplicação de Motores Striling em Veículos Híbridos" DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. MSc CLEBER WILLIAM GOMES

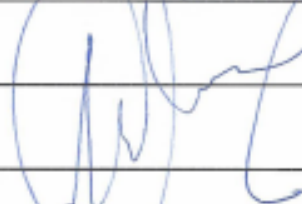


MEMBROS:

PROF. MARCO AURÉLIO FRÓES



PROF. WAGNER MASSAROPE



ALUNOS:

FELIPE SALVADOR VIDAL



MANOEL NEVES LIMA FILHO



Dedicamos este trabalho a nossas famílias, amigos e colegas que sempre estiveram muito próximos a nós, sempre nos auxiliando e nos apoiando para a conclusão deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos aos professores Cleber Willian Gomes, Wagner Massarope e Marco Aurélio Fróes ao atendimento, supervisão, apoio e disponibilidade prestada. Também agradecemos aos nossos familiares, amigos e colegas pelo apoio e por nos entender em nossos momentos difíceis, nunca nos deixando sozinhos ou deixando de prestar todo o apoio possível.

## **RESUMO**

Este trabalho consiste no estudo, apresentação e verificação da compatibilidade de motores Stirling nos veículos híbridos atuais. Apresentação da história do motor, a biografia dos responsáveis pela sua criação e uma breve abordagem do cenário energético atual. É feito um comparativo das diversas arquiteturas deste tipo de motor (alfa, gama e beta), analisando e ponderando suas vantagens e desvantagens em relação aos motores de ciclo Otto e Diesel. É realizada uma análise deste tipo de máquina utilizando o ciclo de Carnot como princípio e apresentados projetos que consistem na aplicação do motor Stirling em veículos automotores.

Logo após é apresentada uma bibliografia atualizada com as diversas arquiteturas e demais fatos que os autores deste trabalho julgam a apresentação necessária.

**PALAVRAS CHAVE:** Stirling, motor a ar quente, motor combustão externa, ecologia, híbrido, alternativo, arquitetura, energia

## **ABSTRACT**

This paper develops the study, introduction and verifies if the Stirling engine has the capacity to be applied in current hybrid vehicles. Initially is realized an introduction about the engine's history, the Robert Stirling's biography (mastermind of this machine) and a quickly study about our energetic matrix. Is realized a comparison of the architectures of this engine (alfa, gama e beta), analyzing and pointing your strong and weak points associating the cycle to the Otto and Diesel engines. Is realized an analysis of Stirling engine with the Carnot cycle as principle and introduced projects that consists in the application of Stirling engines in automobiles.

A bibliographic updated list take part of this paper, with the architectures and some other facts the authors deem necessary.

**KEY WORDS:** Stirling, ecology hybrid, alternative, architecture, energy

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>11</b>
<b>1      INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1    Objetivos e Motivação .....	13
1.2    Contribuições Esperadas .....	13
<b>2      CONTEXTO HISTÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1    Biografia de Robert Stirling.....	15
2.2    História dos Motores Stirling.....	16
<b>3      MOTOR STIRLING .....</b>	<b>20</b>
3.1    Funcionamento do Ciclo Stirling.....	22
3.2    Arquiteturas dos Motores Stirling .....	27
3.3    Aplicação na Área Automotiva .....	29
3.4    Vantagens e Desvantagens .....	33
<b>4      CONCLUSÃO .....</b>	<b>35</b>
4.1    Propostas Futuras .....	36
<b>5      REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>37</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 – Imagem de Robert Stirling (extraída de robertstirlingengine.com, 2014). .....	15
Figura 2 – Esquemático do primeiro motor Stirling fabricado à esquerda e um motor atual à direita (extraído de transformacni-technologie.cz/en_stirlinguv-motor, 2014). .....	17
Figura 3 – Ciclos de admissão, compressão, combustão e escape de um motor Otto (extraído de MARTINS, 2014). .....	18
Figura 4 – Ciclos de compressão, aquecimento, expansão e resfriamento de um motor Stirling (extraído e adaptado de FARIA, 2014). .....	18
Figura 5 – Sistema Stirling de reaproveitamento de energia solar (extraído de CULLEN, 2014). .....	19
Figura 6 – Matriz Energética Brasileira em 2013 (extraída e adaptado do Balanço Energético Nacional de 2013 divulgado pela EPE, Empresa de Pesquisas Energéticas, Ministério de Minas e Energia)...	20
Figura 7 – Progressão PROCONVE (norma reguladora de emissões no Brasil) para veículos leves “L” desde sua implementação em 1988 (extraído e adaptado de anfavea.com.br/, 2014). .....	21
Figura 8 – Curvas “pressão – volume” e “temperatura – entropia” do ciclo Stirling (extraído de nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/, 2014). .....	25
Figura 9 – Compressão isotérmica do ciclo e sua respectiva curva “pressão – volume” (extraído de FARIA, 2014).....	25
Figura 10 – Aquecimento isocórico do ciclo e sua respectiva curva “pressão – volume” (extraído de FARIA, 2014).....	26
Figura 11 – Expansão isotérmica do ciclo e sua respectiva curva “pressão – volume” (extraído de FARIA, 2014).....	26
Figura 12 – Arrefecimento isocórico do ciclo e sua respectiva curva “pressão – volume” (extraído de FARIA, 2014).....	27
Figura 13 – Forma construtiva tipo “Alfa” (extraído de nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/, 2014). .....	28
Figura 14 – Forma construtiva tipo “Beta” (extraído de nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/, 2014). .....	28
Figura 15 – Forma construtiva tipo “Gama” (extraído de nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/, 2014). .....	29
Figura 16 – Projeto experimental “Stir-Lec I”, General Motors (extraído de papers.sae.org/690074/, 2014). .....	30
Figura 17 – DEKA Revolt, veículo híbrido de poluição zero (extraído de inhabitat.com/the-2008-deka-revolt/, 2014).....	30
Figura 18 – DEKA Scooter, scooter híbrida de poluição zero (extraído de greenoptimistic.com/2009/07/01/dean-kamen-stirling-engine-scooter, 2014). .....	31
Figura 19 – Projeção do Tour Engine (extraído de tourengine.com, 2014).....	31
Figura 20 – Projeção do Tour Engine (extraído de tourengine.com, 2014).....	32
Figura 21 – Diagramas “pressão – volume” do ciclo de Carnot (à esquerda) e do ciclo Stirling (à direita).....	32

## Lista de Abreviaturas

GLP	<i>Gás Liquefeito de Petróleo</i>
ANP	<i>Agência Nacional do Petróleo</i>
PROCONVE	<i>Programa de Controle de Emissões Veiculares</i>
$\eta$	<i>Eficiência térmica</i>
$T_c$	<i>Temperatura da fonte fria</i>
$T_H$	<i>Temperatura da fonte quente</i>
$C_i$	<i>Ponto intermediário na câmara fria</i>
$C_{max}$	<i>Ponto-morto superior na câmara fria</i>
$C_{min}$	<i>Ponto-morto inferior na câmara fria</i>
$H_i$	<i>Ponto intermediário na câmara quente</i>
$H_{max}$	<i>Ponto-morto superior na câmara quente</i>
$H_{min}$	<i>Ponto-morto inferior na câmara quente</i>
PV	<i>Pressão - volume</i>

# 1 Introdução

Com a revolução industrial e a grande tendência de automatizar a maior parte possível dos processos industriais nos séculos XVIII e XIX, grandes maquinários surgiam no chão das fábricas para que fosse possível qualquer mínimo aumento de produção. Essas grandes máquinas muitas vezes não atendiam às expectativas depositadas nelas e devido à tecnologia escassa junto à falta de cuidados e demanda sempre crescente de produção, surgiam grandes acidentes de trabalho, na maioria das vezes fatais. O risco de um empregado se acidentar em uma fábrica do tipo era grande demais para que continuassem a se arriscar para ganhar pouco, ou seja, os funcionários começavam a boicotar as indústrias em busca de melhorias. Nesses casos o sindicato entrava em cena, começando a exercer seu papel frequentemente junto à indústria buscando tais melhorias, dentre elas a necessidade de equipamentos mais seguros (ROMÃO, 2013).

Tendo como foco as máquinas à vapor, o motor Stirling foi uma máquina que conseguiu atender satisfatoriamente às expectativas da época. Por trabalhar sem admissão e exaustão era considerado um dos equipamentos mais seguros, o que provocou uma grande mudança nos equipamentos fabris e a atrair novamente empregados para as grandes e cada vez mais automatizadas empresas, dessa vez mais seguras (SCHULZ, 2009).

Criado e aperfeiçoado por Robert Stirling em conjunto com seu irmão James Stirling no ano de 1816 e visando a substituição do motor a vapor, o motor Stirling é teoricamente a máquina térmica mais eficiente, atingindo um nível de rendimento de aproximadamente 40%. Motores Stirling de menor porte e fabricados atualmente conseguem atingir um rendimento de 45%, mas são motores experimentais que estão sendo desenvolvidos devido à recente preocupação com esse tipo de ciclo, que até então havia sido esquecido, podendo ser referenciado também como “motor de ar quente” devido à utilização de gases atmosféricos como fluido de trabalho ser a mais comum.

Surpreendendo pela sua simplicidade ao ser basicamente formado de por câmaras com canais comunicantes entre si que promovem o aquecimento e arrefecimento de um determinado fluido de modo ininterrupto e gerando uma movimentação cíclica, ele também é considerado um motor multi-combustível por poder entrar em funcionamento com diversas fontes energéticas, como gasolina, etanol, metanol, GLP, energia solar, energia geotérmica etc.

Em meio a tanta simplicidade e grande eficiência, o alto custo de desenvolvimento de motores do tipo aliado às dificuldades operacionais para aplicações em que é requerida uma resposta imediata acaba criando um grande contraste que acaba por balancear méritos e deméritos deste; porém empresas têm investido em pesquisas e desenvolvimento desse tipo de motor, como a Philips, ainda que pelo apelo ecológico e de energia renovável que vem sendo trazido pelo mercado internacional durante os últimos anos e não mais com a intenção de substituir as máquinas atuais por mais seguras, como fez Stirling na década de 1810.

## **1.1 Objetivos e Motivação**

Este trabalho tem por objetivo apresentar, explicar e detalhar toda a história, funcionamento, componentes e aplicações dos motores Stirling com ênfase na área automobilística. Devido ao período atual em que sempre se vê tamanho desenvolvimento de veículos híbridos com combustíveis alternativos, consideramos viável e lógico apresentar o que pode ser considerado a máquina térmica de melhor aproveitamento possível, sendo comprovado pelo ciclo de Carnot. Apesar de ser considerado um motor de combustão externa e não interna, os motores Stirling são aplicados em diversos setores importantíssimos para o desenvolvimento de qualquer país (como a NASA faz em explorações espaciais e o exército dos EUA em seus submarinos), o que comprova que é um motor perfeitamente funcional.

A motivação parte da verificação e conclusão que uma máquina térmica tão importante como a criada e aperfeiçoada por Robert Stirling seja desconhecida e citada pouquíssimas vezes quando o assunto é veículos híbridos. A falta de informações e apresentação do tema nas universidades deixa um espaço em branco quando se prioriza, quase que exclusivamente, os ciclos Diesel e Otto, prejudicando a avaliação de ciclos com características de funcionamento diferentes que poderiam ser aplicadas como método de resolução de alguns problemas atuais.

## **1.2 Contribuições Esperadas**

As contribuições estão relacionadas com os objetivos descritos na subseção 1.1:

- a) Reflexão crítica sobre o funcionamento dos motores Stirling;
- b) Consolidação do conhecimento do leitor;
- c) Desenvolvimento da pesquisa dinâmica referente aos assuntos abordados neste trabalho;

- d) Referências bibliográficas atualizadas que demonstrem com clareza e exatidão informações sobre o ciclo abordado;
- e) Estudo da aplicação dos motores Stirling em veículos híbridos;
- f) Sugestões futuras para incrementos posteriores a este trabalho.

## 2 Contexto Histórico

Antes da invenção das máquinas à vapor, as indústrias se localizavam em zonas rurais e próximas à rios, utilizando assim a energia hidráulica proveniente do deslocamento da água como energia motriz para seus processos de produção (LARANJEIRAS, 2012). Com o surgimento das máquinas à vapor, essas indústrias começaram a se deslocar para a cidade atrás de mão de obra, afinal o deslocamento foi facilitado devido à possibilidade da não-dependência da energia hidráulica. Com as instalações insalubres e totalmente inadequadas quanto às questões humanas, as empresas literalmente amontoavam funcionários com péssimas condições de trabalho, de alimentação e de segurança, o que começou a revoltar os trabalhadores ali presentes.

Apesar de representar um grande marco histórico, a Revolução Industrial teve alguns problemas crônicos. Devido à falta de tecnologia para desenvolvimento dos maquinários, os equipamentos representavam um risco constante. Não era raro de se ouvir nas ruas dos subúrbios que uma caldeira tinha explodido e ferido mortalmente alguns funcionários, fato que provocou a revolta da população quanto às condições de trabalho da época.

Dentre esse grande problema surgia a motivação que Robert Stirling utilizou para desenvolver seu motor: retomar a segurança nas fábricas aplicando como substituição à máquina a vapor, uma máquina térmica segura, eficiente e de fácil operação.

### 2.1 Biografia de Robert Stirling

Robert Stirling nasceu em 25 de Outubro de 1790 na Escócia. Terceiro de uma família de oito filhos, desenvolveu trabalhos científicos de grande auxílio ao universo acadêmico enquanto estudava no Colégio de Edinburgh, no período de 1805 a 1808.



Figura 1 – Imagem de Robert Stirling (extraída de [robertstirlingengine.com](http://robertstirlingengine.com), 2014).

Iniciou em novembro de 1809 como estudante da Divindade na Universidade de Glasgow e completou cinco anos de estudo como um modelo exemplar. Em 15 de Novembro de 1814 iniciou-se novamente como estudante da Divindade, porém dessa vez na Universidade de Edinburgh, local já conhecido e onde manteve seu status de estudante exemplar. Finalmente em 1815, Stirling foi examinado pelo Presbitério de Dunbarton e, após serem realizados diversos testes, foi classificado como apto para preencher uma vaga no clero.

Pouco depois, Robert foi introduzido à engenharia pelo seu pai, Patrick Stirling, que possuía especialização em equipamentos mecânicos e em particular fontes de energia para maquinários. Robert registrou patente de seu motor de ar-quente em 27 de Setembro de 1816, sendo essa processada apenas em 20 de Janeiro de 1817. Trabalhou alguns anos mais em suas máquinas antes de se mudar para Kilmarnock, onde suas pesquisas e melhorias continuaram.

Casou-se em 10 de Julho de 1819 com Jean Rankin, filha de William Rankin, comerciante em Kilmarnock, e Jean McKay. Morreu em Galston em 06 de Junho de 1878, deixando como principal herança aos seus herdeiros seu motor, cujo qual ainda pode ser largamente difundido pelo seu imenso potencial.

## **2.2 História dos Motores Stirling**

O primeiro motor Stirling foi construído em 1816 por Robert Stirling e James Stirling, seu irmão, visando a substituição das máquinas a vapor que provocavam um alto índice de acidentes na época. Devido à tecnologia precária aplicada nos motores da época, eles costumavam se romper durante o regime de trabalho ou tinham grandes riscos de vazamentos dos vapores contidos em grandes pressões e altas temperaturas, o que facilmente podia matar algum funcionário. Em 1843 Robert e seu irmão alteraram o desenho esquemático de seu projeto e realizaram uma reestilização em seus motores, o que proporcionou um ganho de potência suficiente para que o motor pudesse operar um maquinário de médio porte em uma fundição de metais na Escócia (ALMEIDA, 2007).

Realizado para substituir as máquinas a vapor operando com uma pressão mais controlada, com um nível de segurança maior, e com um nível de ruído também mais baixo, o motor Stirling foi sofrendo atualizações e incrementos com o tempo. Uma das mais importantes para a época foi realizada por Henry Bessemer, que desenvolveu um processo de fundição de ferro beneficiado e assim criou o aço Bessemer em 1876. Tal aço era menos quebradiço e muito mais resistente a altas temperaturas, ganhando grande visibilidade na

indústria metalúrgica e bélica (VIEIRA, 2013). É relevante também destacar a invenção do regenerador por Robert Stirling. Aplicado aos motores Stirling, o regenerador permite que o rendimento de seu motor de ar-quente seja muito maior, próximo ao rendimento teórico máximo que é ditado pelo “Ciclo de Carnot”.

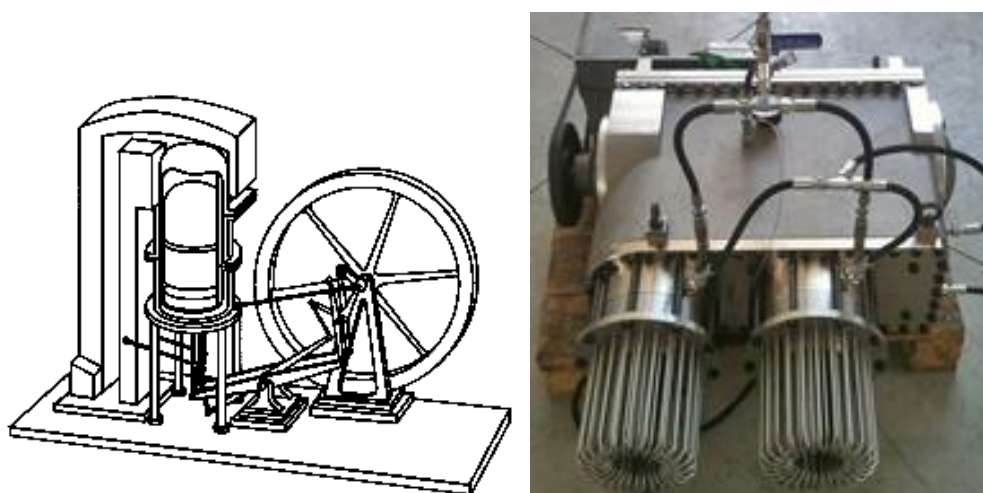


Figura 2 – Esquemático do primeiro motor Stirling fabricado à esquerda e um motor atual à direita (extraído de [transformacni-technologie.cz/en\\_stirlinguv-motor](http://transformacni-technologie.cz/en_stirlinguv-motor), 2014).

Fleeming Jenkin sugeriu em 1884 que todas as máquinas a combustão externa, com ciclo fechado e com fluido de trabalho no estado gasoso passassem a ser chamadas, a partir dali, de motores Stirling. A iniciativa não deu certo e as empresas continuaram a nomear seus próprios esquemas deste tipo de motor com nomes próprios. Devido à dificuldade de montagem pela baixíssima tolerância entre as peças para que pudesse ter um bom rendimento e ao seu custo de fabricação, teve um uso considerável até a década de 1920 quando foi substituído por motores de combustão interna devido à facilidade de montagem, à redução de custos para produção, à relação custo x potência gerada e, conseqüentemente, à possibilidade de aumentar largamente a produção.

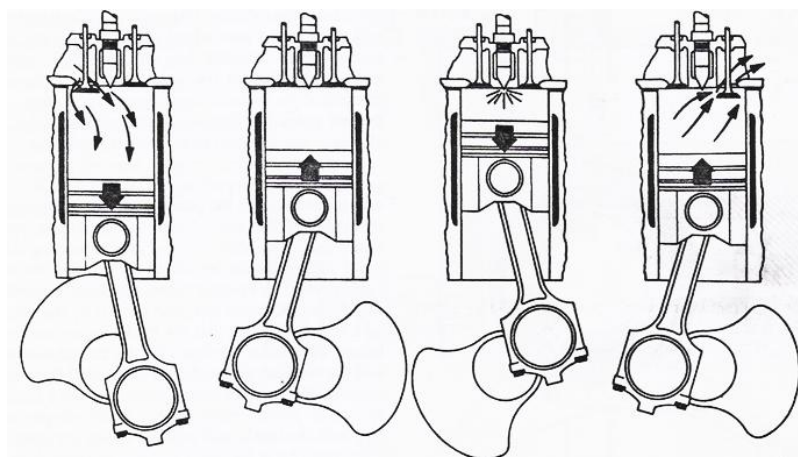


Figura 3 – Ciclos de admissão, compressão, combustão e escape de um motor Otto (extraído de MARTINS, 2014).

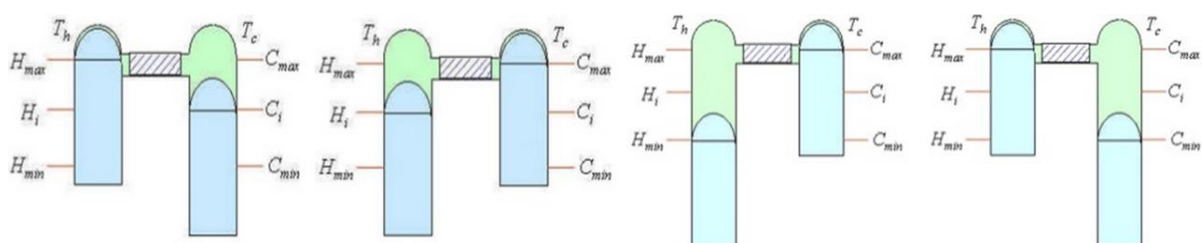


Figura 4 – Ciclos de compressão, aquecimento, expansão e resfriamento de um motor Stirling (extraído e adaptado de FARIA, 2014).

Com a descoberta dos aços inoxidáveis pouco antes a Segunda Guerra Mundial e o aumento do nível de conhecimento da população, o que permitia explicar matematicamente o que de fato acontecia em uma máquina térmica de um modo cada vez mais simples, o motor Stirling ganhou foco novamente: fabricantes e desenvolvedores retomaram processos de pesquisa e otimização dos motores, o que acabou por deixá-lo mais barato e com um aproveitamento ainda maior. Tal otimização pode ser considerada o motivo pelo qual os motores Stirling são utilizados ainda hoje.

Além de ser pouco poluente devido à combustão contínua e a possibilidade de utilizar energias renováveis, como a solar, por exemplo, o motor Stirling pode ser ainda ser silencioso e ter baixíssimo nível de vibração pelo fato de não possuir válvulas ou muitos elementos móveis, além de ter uma facilidade de adaptação fora do comum, item que é justificado pela variedade de arquiteturas Stirling. Mesmo com essas características proveitosas, o motor ainda tem um custo elevadíssimo em comparação aos motores de combustão interna, já que seus componentes precisam ser perfeitamente acabados para manter a vedação mais próxima possível da perfeita, sem contar que a fabricação deste depende de alguns materiais específicos.

A Philips acabou entrando em cena no final da década de 1930, sendo uma das maiores responsáveis pelo reinteresse do até então quase extinto motor e o aplicando em diferentes áreas industriais, como aplicação de gerador em áreas sem energia elétrica; tal iniciativa desenvolveu aos poucos a curiosidade de estudar e aprimorar os motores por outras empresas devido às tendências atuais, devolvendo ao ciclo Stirling a oportunidade de se reerguer em meio a tantos outros tipos de motores.

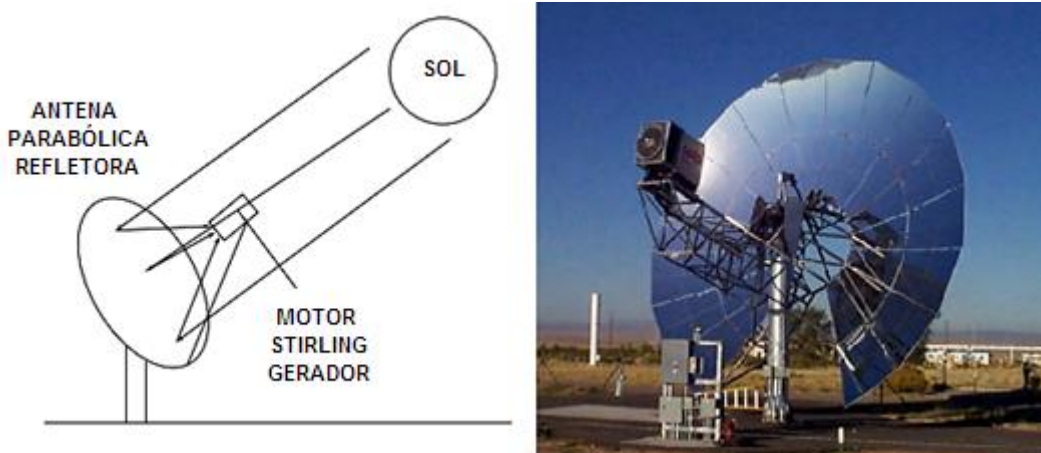


Figura 5 – Sistema Stirling de reaproveitamento de energia solar (extraído de CULLEN, 2014).

### 3 Motor Stirling

Energias provenientes de fontes renováveis têm sido tendência no cenário mundial atualmente; agindo diretamente na geração da energia, as mudanças e objetivos de pesquisas e investimentos no desenvolvimento dessas novas tecnologias é a redução de poluentes. As principais formas de energia que estão sendo comumente utilizadas e/ou sob alvo de pesquisas são a energia eólica, térmica, nuclear, solar etc. É na transformação de energia térmica para energia mecânica que se enquadra a aplicação do motor Stirling.

Segundo a Agência Nacional do Petróleo – 2008, se nossos métodos e formas de uso mundial do petróleo continuarem parecidas, o planeta terá mais quarenta anos de utilização do petróleo. Com relação à outras fontes não-renováveis, estima-se que as de gás natural durem por cerca de cem anos e as de carvão mineral por mais duzentos anos (MATTOZO, 2001 apud BARROS, 2005).

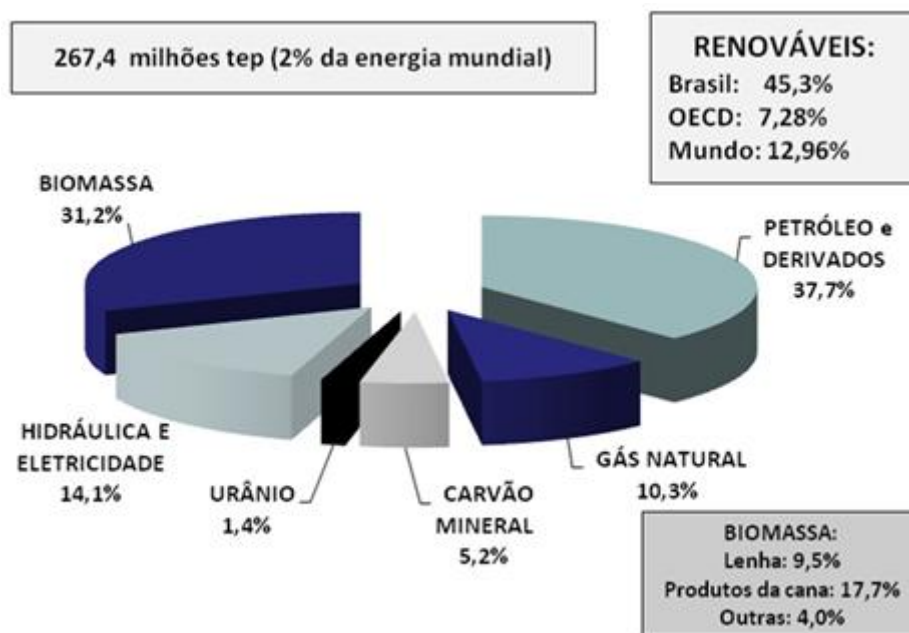


Figura 6 – Matriz Energética Brasileira em 2013 (extraída e adaptado do Balanço Energético Nacional de 2013 divulgado pela EPE, Empresa de Pesquisas Energéticas, Ministério de Minas e Energia).

Analisando a matriz exposta acima, podemos observar que o cenário energético brasileiro atual tem grande caráter renovável, tendo progredido de forma exponencial nos últimos anos devido ao crescimento de pesquisas e desenvolvimentos com esse tipo de fontes de energia (OSAKI, 2013). Essa preocupação motivou a retomada do desenvolvimento de

motores Stirling, já que o motor precisa apenas de uma fonte de calor para que transforme essa energia térmica em energia mecânica, podendo essa última ser convertida posteriormente para energia elétrica, por exemplo.

Com o desenvolvimento da tecnologia dos materiais e outras dificuldades que eram expostas na época em que Robert Stirling tentava aperfeiçoar sua máquina, hoje o desenvolvimento desse tipo de motor é cada vez mais simples para a indústria e seu custo cai cada vez mais, tornando possível projetos de aproveitamento de perda térmica em motores, projetos de disponibilização de energia elétrica em áreas remotas, aproveitamento de energia solar etc.

É importante também frisar que com as novas normas de emissões de poluentes que entram em vigor no mundo todo com uma frequência de atualização cada vez maior, as fabricantes de veículos se movimentam cada vez mais para atender à legislação vigente. Considerada por especialistas como plano de incentivo ao desenvolvimento de veículos híbridos e elétricos, a Euro VI surgiu na União Europeia e foi difundida em outros países, como é o caso do Brasil que possui a legislação referente à emissões regulamentada pelo PROCONVE (Programa de Controle de Emissões Veiculares).

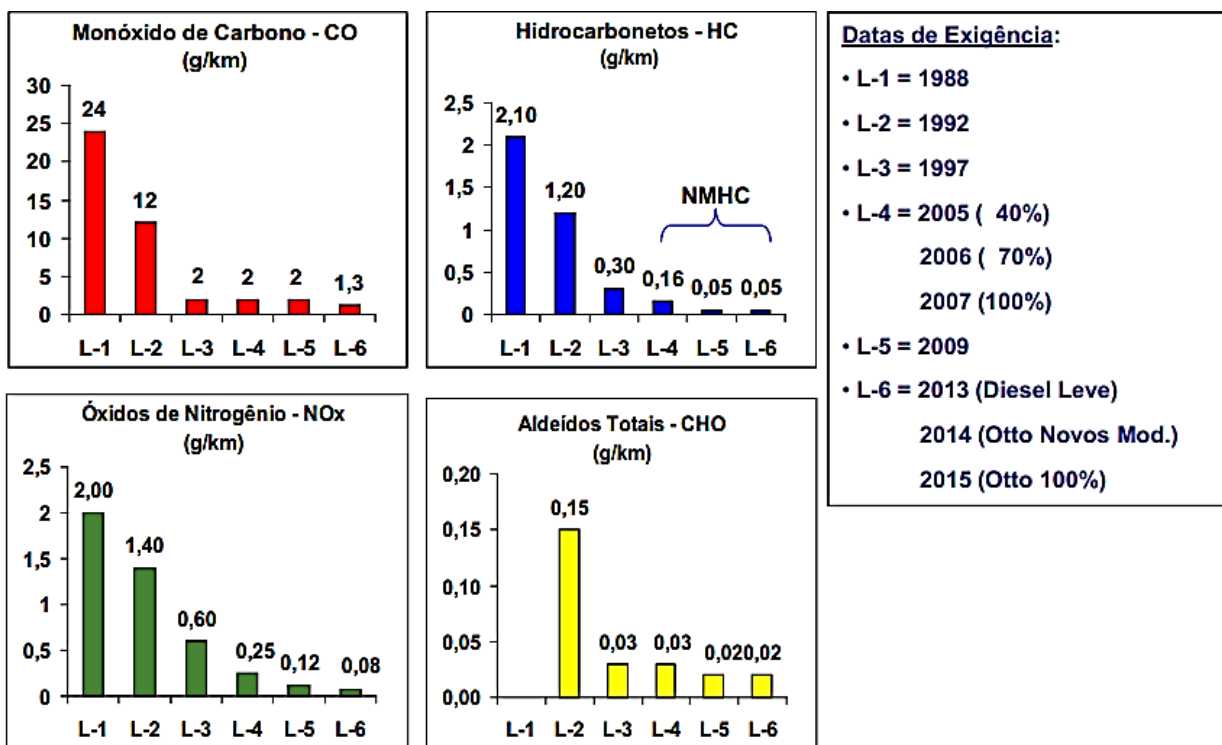


Figura 7 – Progressão PROCONVE (norma reguladora de emissões no Brasil) para veículos leves “L” desde sua implementação em 1988 (extraído e adaptado de [anfavea.com.br/](http://anfavea.com.br/), 2014).

Considerando a abrangência de diversas legislações que determinam quantidades aceitáveis de emissões de poluentes em automóveis pelo mundo inteiro, surge a necessidade de desenvolver novos métodos para que torne o progresso que se tem conseguido desde suas implementações contínuo. Grandes empresas visualizam que o motor Stirling tem a sua principal vantagem em relação ao Otto e Diesel em sua capacidade de trabalhar em ciclo fechado e com uma fonte de calor externa, não necessitando exclusivamente de uma queima de combustível para seu funcionamento, podendo aproveitar calor de outros componentes de veículos, por exemplo. Dessa forma, o motor Stirling pode ter uma emissão de poluentes nula para gerar uma potência satisfatória, ficando dependente da arquitetura, forma de construção, qualidade de construção e tamanho do motor.

### 3.1 Funcionamento do Ciclo Stirling

O motor de Stirling, também conhecido como motor de combustão externa, é a máquina de maior aproveitamento na transformação de energia térmica em mecânica, com eficiência em torno de 40%, eficiência considerada muito melhor quando comparado às transformações realizadas nos Otto e Diesel que giram em torno dos 20% e 30% (FIGUEIREDO, 2003).

Eficiência termodinâmica para mesma temperatura é igual ao ciclo Carnot, surge daí (FARIAS, 2012 – FATEC Santo André, notas de aula):

$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$	1
------------------------------	---

Onde  $\eta$  é a eficiência,  $T_C$  temperatura da fonte fria e  $T_H$  temperatura da fonte quente.

Para um processo a temperatura constante de um gás ideal, temos:

Lei do gases ideais

$pv = nRT$	2
------------	---

O trabalho realizado por um gás ideal numa variação isotérmica do volume, utilizando a definição de trabalho e a equação proveniente à equação de estado, resulta em:

$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv$	3
-----------------------------	---

$p = \frac{nRT}{v}$	4
---------------------	---

Logo,

$W = \int_{v_1}^{v_2} \frac{nRT}{v} dv$	5
---	---

Como nRT são constantes, temos;

$W = nRT \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{v} dv$	6
---	---

$W = nRT (\ln \frac{v_2}{v_1})$	7
---------------------------------	---

$W = nRT (\ln v_2 - \ln v_1)$	8
-------------------------------	---

$W = nRT \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$	9
--	---

Substituindo a equação 1 na equação 8, temos que o trabalho realizado pelo sistema é dado por:

$Q = W = p v \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$	10
--	----

Expansão isotérmica

$\ln \frac{v_2}{v_1} > 0$	11
---------------------------	----

Compressão isotérmica

$\ln \frac{v_2}{v_1} < 0$	12
---------------------------	----

Onde “v2” equivale ao volume final e “v1” ao volume inicial.

A eficiência térmica do ciclo de Stirling pode ser escrita como:

$t = \frac{Q_s - Q_r}{Q_s} = \frac{[p_1 v_2 \ln \frac{v_2}{v_1} - p_3 v_3 \ln(\frac{v_3}{v_4})]}{p_1 v_1 \ln(\frac{v_2}{v_1})} = \frac{mRT_1 \ln(\frac{v_2}{v_1}) - mRT_3 \ln(\frac{v_3}{v_4})}{mRT_1 \ln(\frac{v_2}{v_1})}$	13
--	----

Qs é o calor cedido da fonte quente e Qr o calor recebido pela fonte fria.

Mas;

$v_2 = v_3 \text{ e } v_1 = v_4$	14
----------------------------------	----

Considerando,

$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4}$	15
-------------------------------------	----

Temos que;

$t = \frac{T_1 - T_3}{T_1} = \frac{T_H - T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$	16
---	----

Diferentemente dos ciclos Otto e diesel que realizam combustão dentro da câmara, o motor Stirling trabalha por combustão externa, dessa forma pode utilizar praticamente todo tipo de combustível, sendo importante que exista uma diferença de temperatura considerável entre as câmaras, portanto quanto maior esse delta maior a eficiência do motor. Outra

diferença importante é que funciona com fluido gasoso constante nos cilindros, também conhecido como fluido de trabalho. Realiza ciclos que consiste de quatro processos internamente reversíveis em dois tempos. Os ciclos são compressão (temperatura constante), aquecimento (volume constante), expansão (temperatura constante) e arrefecimento (volume constante).

Também pela necessidade de obter energia calorífica externa tem vantagem quanto ao processo de lubrificação, muito complicado nos Otto e Diesel, pois a combustão ocorre em contato com as partes moveis do motor. Também por não possuir válvulas emite menor poluição sonora.

Consiste de duas câmaras ou apenas uma com diferentes temperaturas de trabalho, uma para aquecimento do gás e outra para seu resfriamento.

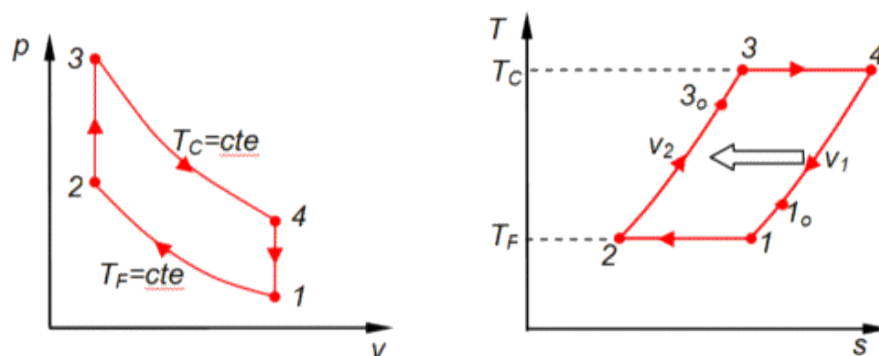


Figura 8 – Curvas “pressão – volume” e “temperatura – entropia” do ciclo Stirling (extraído de [nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/](http://nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/), 2014).

1 – 2 - Compressão isotérmica (temperatura constante). O pistão frio se move para cima até o ponto intermediário Ci devido à esforços mecânicos do motor em funcionamento, comprimindo o fluido de trabalho. O calor gerado pela compressão é removido do gás pelo regenerador, caracterizando a curva no diagrama PV.

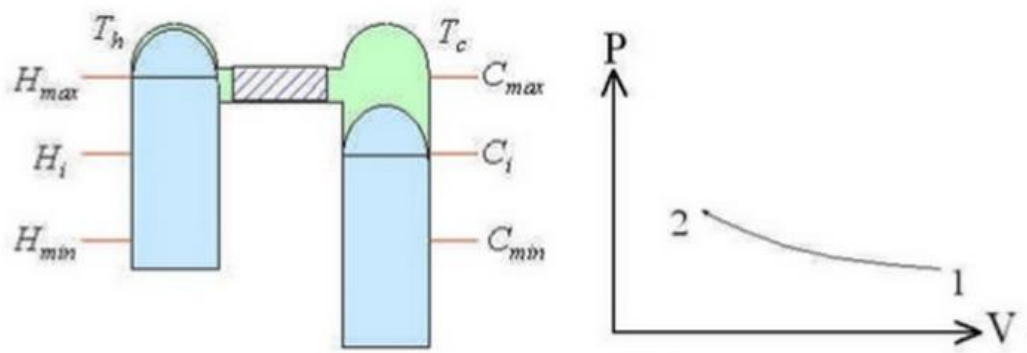


Figura 9 – Compressão isotérmica do ciclo e sua respectiva curva “pressão – volume” (extraído de FARIA, 2014).

2 – 3 - Aquecimento isocórico (volume constante). O pistão do lado frio continua se movendo até o ponto  $C_{max}$  enquanto o pistão quente desce até  $H_i$ , fazendo o gás contido no sistema passar pelo regenerador. Assim que o gás, anteriormente frio, passa pelo regenerador (que continha calor proveniente do ciclo 4 – 1 e 1 – 2 anterior), fornecendo calor para o fluido e aumentando a pressão do sistema devido ao volume constante.

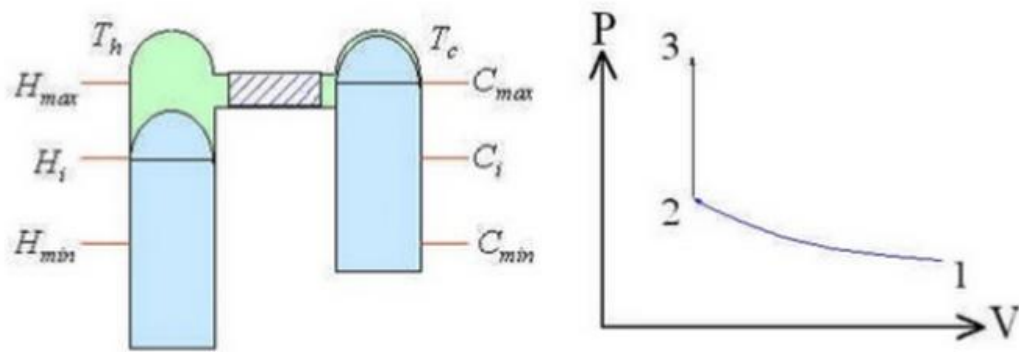


Figura 10 – Aquecimento isocórico do ciclo e sua respectiva curva “pressão – volume” (extraído de FARIA, 2014).

3 – 4 - Expansão isotérmica (temperatura constante). O gás é aquecido pela fonte de calor externa, provocando a expansão do gás e deslocando o pistão da câmara quente até  $H_{min}$ .

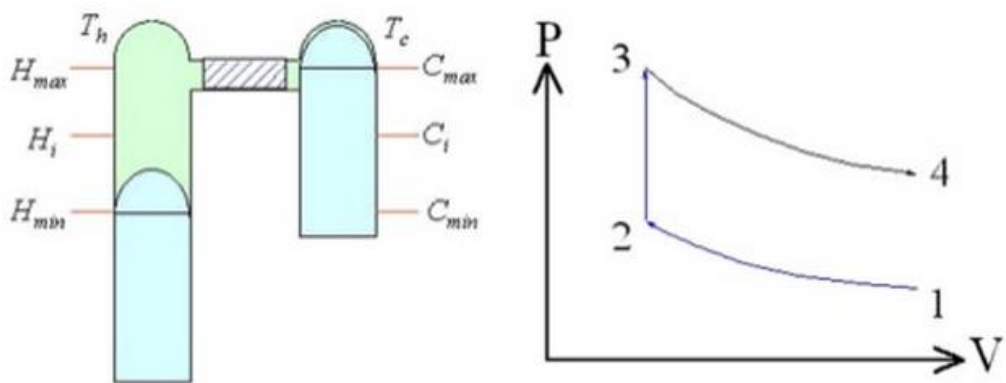


Figura 11 – Expansão isotérmica do ciclo e sua respectiva curva “pressão – volume” (extraído de FARIA, 2014).

4 – 1 - Arrefecimento isocórico (volume constante). Quando o pistão da câmara quente retorna a  $H_{max}$ , o pistão frio simultaneamente retorna a  $C_{min}$ , forçando o gás passar pelo regenerador que retém seu calor, o armazenando para o próximo ciclo 2 – 3. Esta transformação se dá em volume constante e provoca uma queda de pressão no gás.

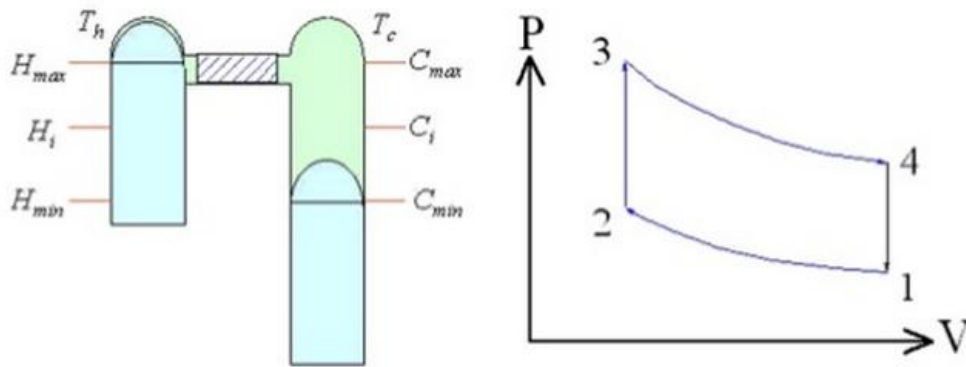


Figura 12 – Arrefecimento isocórico do ciclo e sua respectiva curva “pressão – volume” (extraído de FARIA, 2014).

É importante ressaltar que para seu funcionamento podem ser utilizados diversos tipos de fluidos, como o ar, hélio, hidrogênio pressurizado, entre outros. Esses gases são preferíveis por terem condutividade térmica elevada e baixa viscosidade (FARIA, 2013). O regenerador aplicado nos motores também é de vital importância. Formado por vários tubos ou material poroso que tem uma capacidade de troca térmica elevada, funciona como um trocador de calor que ora retém, ora fornece calor ao gás, forçando que as transformações ocorram em temperaturas menos variáveis e que o ciclo se torne mais próximo do teórico.

Existem três tipos de arquiteturas e/ou formas construtivas que podem ser aplicadas em diferentes áreas visando as necessidades do processo.

### 3.2 Arquiteturas dos Motores Stirling

#### Tipo Alfa

Este é o modelo mais complexo por necessitar de dois cilindros e dois êmbolos posicionados a 90° um do outro. Possui o regenerador externamente conectando um cilindro a outro, esse componente auxilia nas trocas térmicas com o exterior reduzindo a temperatura do gás quando preciso e aumentando a vida útil do motor. Executa movimento ascendente e descendente que é transformado em rotativo pela árvore de manivelas.

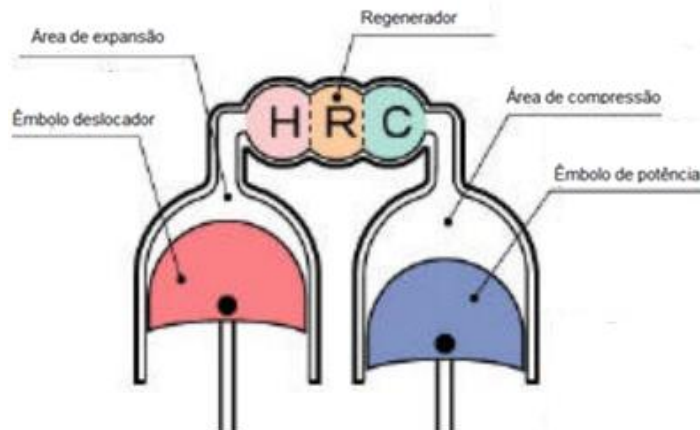


Figura 13 – Forma construtiva tipo “Alfa” (extraído de [nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/](http://nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/), 2014).

### Tipo Beta

O tipo beta possui apenas um cilindro com dois êmbolos na mesma manivela. O êmbolo que realiza a compressão do ar está solto no cilindro permitindo a passagem do gás, realizando as trocas térmicas que o sistema necessita para realização do trabalho.

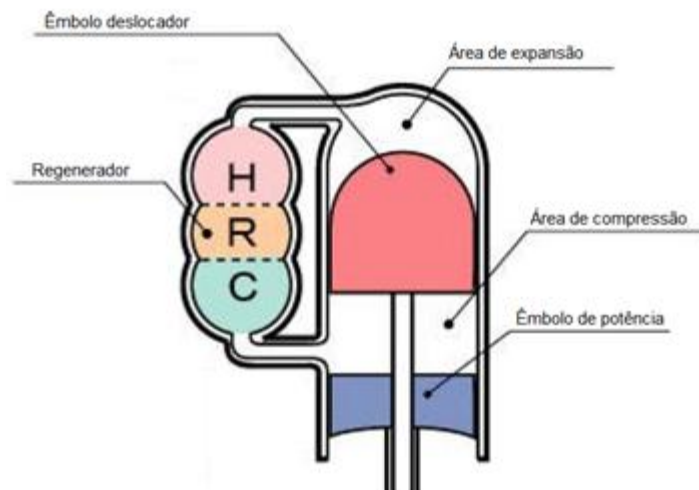


Figura 14 – Forma construtiva tipo “Beta” (extraído de [nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/](http://nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/), 2014).

### Tipo Gama

Esta configuração tem o funcionamento semelhante ao Alfa com a diferença na disposição dos êmbolos, que nesse tipo são colocados em paralelos.

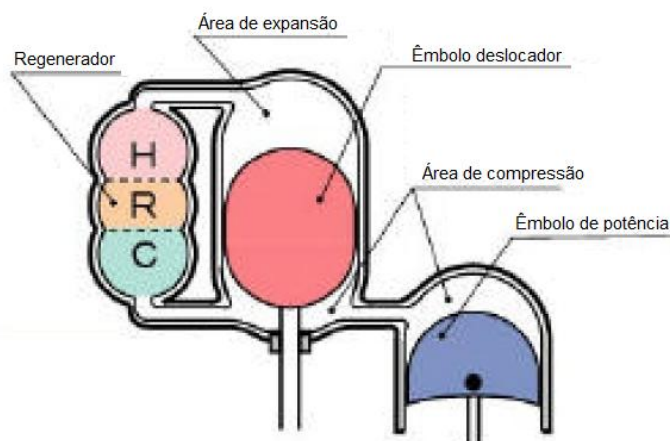


Figura 15 – Forma construtiva tipo “Gama” (extraído de [nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/](http://nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/), 2014).

### 3.3 Aplicação na Área Automotiva

Apesar das inúmeras tentativas e milhões de dólares gastos em pesquisas e desenvolvimento pela Ford, GM e NASA em desenvolver veículos híbridos com motores Stirling, esses veículos nunca foram lançados ao público. A três citadas conseguiram realizar um veículo dessa forma. A Ford conseguiu um veículo que utilizava o motor Stirling como um motor primário para locomoção, mas o primeiro problema encontrado era que o veículo não respondia assim que o motorista fizesse uma determinada ação, como acelerar o veículo. Segundo (FLUMMO, 2008), esse *delay* era algo em torno de vinte segundos. Ou seja, após realizado o feito de “acelerar”, o motor só teria a capacidade de responder à altura vinte segundos depois.

A NASA seguiu a mesma linha da Ford e realizou um veículo que usava o motor Stirling como primário, sendo a modificação de uma Dodge D-150 a mais sucedida. Apesar de serem realizados vários testes e algumas propagandas do projeto, a responsável encontrou os mesmos problemas que a Ford, suspendendo o projeto logo depois. Já a GM tentou inovar na questão de veículo híbrido. Apelidado de Stir-Lec I, o projeto teve uma alteração na carroceria de um Opel Kadett para alocação de um motor elétrico como motor principal e um motor Stirling para funcionar como um gerador de eletricidade. Dessa forma, o motor Stirling seria responsável por recarregar as baterias do veículo conforme sua locomoção (LOHNES apud BLANCO, 2009).

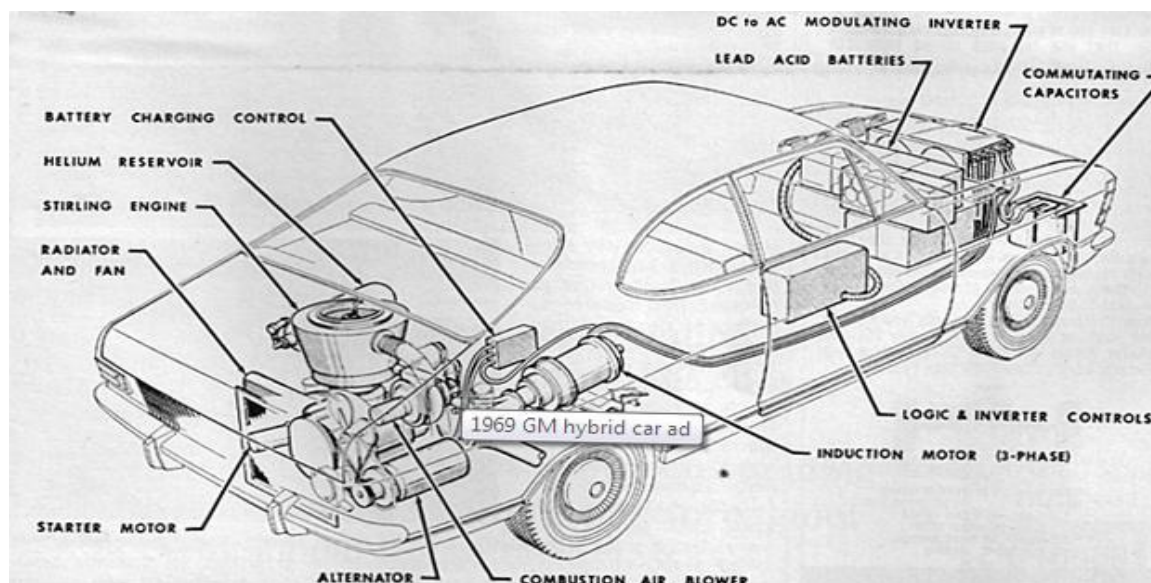


Figura 16 – Projeto experimental “Stir-Lec I”, General Motors (extraído de [papers.sae.org/690074/](http://papers.sae.org/690074/), 2014).

Apesar das tentativas de desenvolvimento desse tipo de veículo terem estagnado na década de 70, atualmente existe um especialista que mantém reservadas diversas patentes referentes a veículos equipados com motores Stirling. Dean Kamen, idealizador e inventor da Segway e a trabalho pela DEKA labs. UK, lançou ao público uma versão modificada de um Ford TH!NK, o tornando híbrido. Seguindo a mesma linha de raciocínio da GM em 1970, ele utilizou os motores Stirling como secundários, dessa vez de forma a aquecer e esfriar o interior do veículo devido a esses componentes terem um impacto muito grande no consumo de energia em veículos comuns, principalmente em regiões frias. Além disso, Dean alega que, caso necessário, o motor Stirling pode recarregar as baterias sem problemas, basta fazer com que o motor queime alguma fonte de energia para poder entrar em funcionamento. “Caso o veículo possua diesel, ele queimará diesel. Caso o veículo possua gás, ele queimará gás. Basta apenas descobriremos e evoluirmos esses combustíveis de forma a torná-los o menos agressivo possível para o meio ambiente.” (KAMEN, 2008).



Figura 17 – DEKA Revolt, veículo híbrido de poluição zero (extraído de [inhabitat.com/the-2008-deka-revolt/](http://inhabitat.com/the-2008-deka-revolt/), 2014).

Além do veículo, Dean possui outras patentes referentes a projetos semelhantes. Um deles é a Scooter movida por motor Stirling, frisando que esse projeto permanece em desenvolvimento e não foi lançado ao público. Em relação aos desenvolvimentos e seus custos, um grupo Norueguês têm apoiado e investido na DEKA labs. UK com o objetivo de lançar abertamente os projetos ao público.

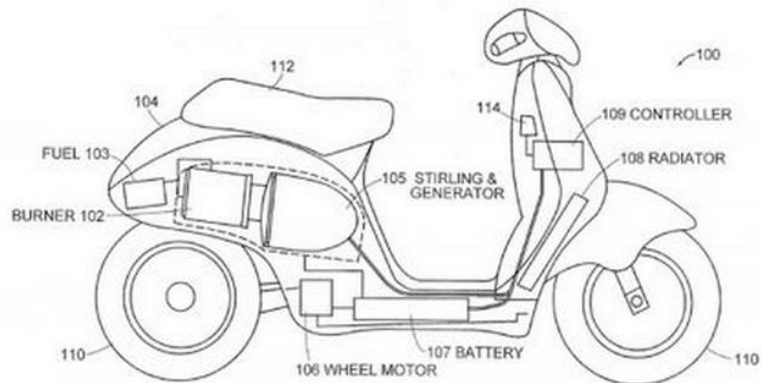


Figura 18 – DEKA Scooter, scooter híbrida de poluição zero (extraído de [greenoptimistic.com/2009/07/01/dean-kamen-stirling-engine-scooter](http://greenoptimistic.com/2009/07/01/dean-kamen-stirling-engine-scooter), 2014).

Um outro projeto que está em desenvolvimento e que, mesmo não sendo um Stirling, aproveita a lógica, é o motor TourEngine que se baseia na separação das fases quentes e frias, aumentando o aproveitamento do motor como um todo.

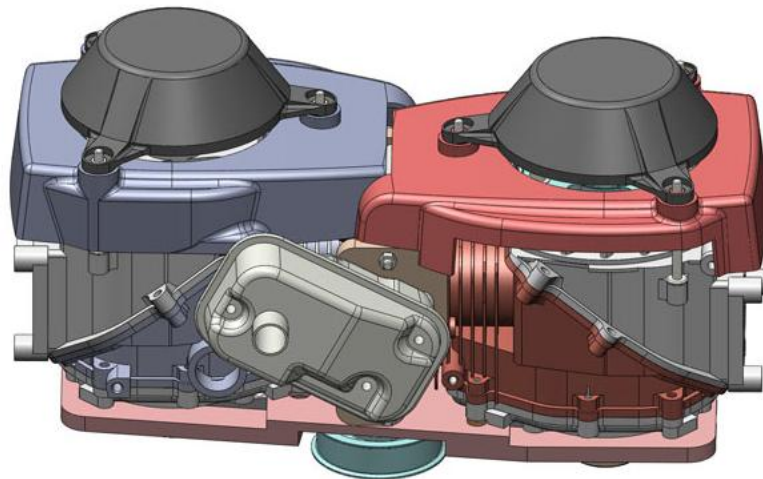


Figura 19 – Projeção do Tour Engine (extraído de [touengine.com](http://touengine.com), 2014).

Este projeto divide o motor em duas metades, no entanto, conectadas por uma válvula. Essa divisão é feita com base das necessidades dos ciclos. O lado frio realiza as fases de

admissão e compressão enquanto que a parte quente realiza as fases de expansão e escape. A estimativa é que esse projeto, com câmaras de tamanhos diferentes, aumente a eficiência do motor em aproximadamente 20%, podendo incrementar a eficiência dos motores atuais para cerca de 50% e reduzir as emissões de dióxido de carbono em um terço. “Nos motores convencionais você perde cerca de 40% da energia disponível para o sistema de arrefecimento e cerca de 30% pelo escapamento (TOUR, 2013).

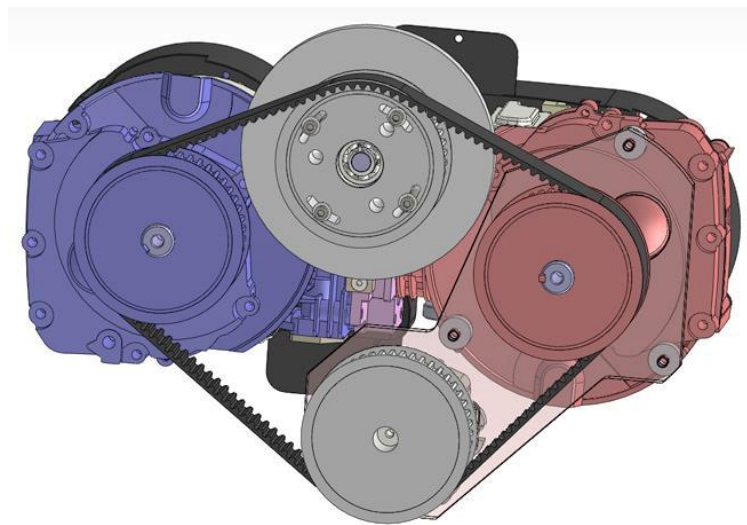


Figura 20 – Projeção do Tour Engine (extraído de [tourengine.com](http://tourengine.com), 2014).

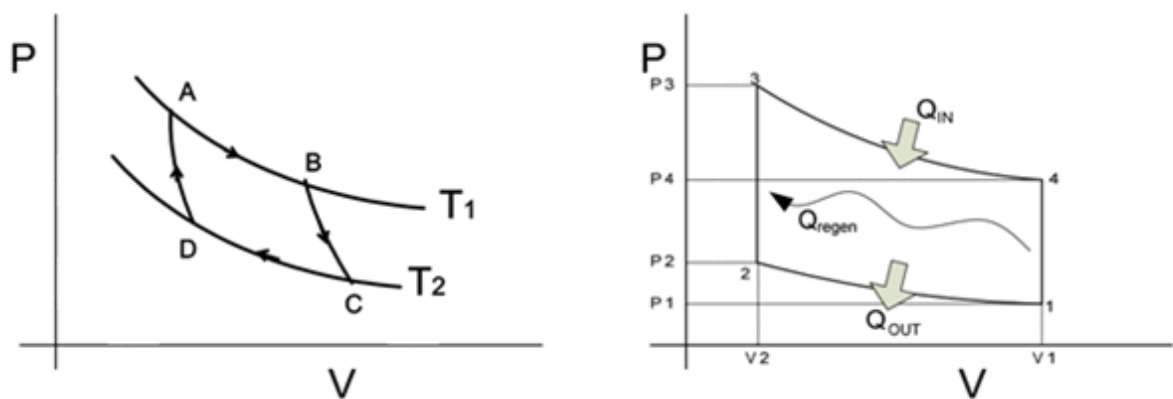


Figura 21 – Diagramas “pressão – volume” do ciclo de Carnot (à esquerda) e do ciclo Stirling (à direita).

O diagrama PV (pressão-volume) de um motor Stirling ideal é apresentado na Figura 20, exibindo que suas características, apesar de diferentes das do ciclo perfeito (ciclo de Carnot), são bem parecidas. De acordo com Carnot, teoricamente esse motor é capaz de atingir o melhor aproveitamento possível de uma máquina térmica.

É importante frisar que os motores Otto e Diesel podem ter um maior aproveitamento, se aproximando da eficiência de um motor Stirling, mas não em condições normais, e sim em

projeções imaginárias (FENN, 1982). Esses motores têm sua eficiência limitada devido à compressão limitada por questões hidrostáticas, ou seja, pela impossibilidade de compressão do fluido de trabalho após certo limite, além de outros fenômenos, como a perda de energia calorífica. Ainda segundo Fenn, podemos afirmar que o motor Otto pode ter um aproveitamento maior que o Diesel, diferente do que vemos hoje. O que acontece é que o motor Diesel consegue comprimir mais o fluido de trabalho e, por conta disso, acaba sendo mais eficiente que o Otto, esse que possui dificuldade em alcançar a mesma taxa de compressão devido à combustão espontânea pela alta pressão nos cilindros.

Outra peculiaridade que se observa na comparação entre os motores é que o motor Stirling é o motor mais sensível à variação de temperatura, onde qualquer que seja a variação, impactará mais em seu rendimento do que a mesma variação nos motores Otto e Diesel (FENN, 1982).

### **3.4 Vantagens e Desvantagens**

A principal vantagem do ciclo sem dúvida nenhuma é sua capacidade de realizar trabalho e não emitir poluentes. Trabalhando em ciclo fechado, o gás contido em seu interior nunca é substituído, permitindo também que ele trabalhe com diversos tipos de fluidos. É silencioso e tem baixo nível de vibrações por não ter partes móveis em excesso, aumentando ainda mais a gama de aplicações.

Além disso, pode também reaproveitar qualquer energia térmica presente para aquecimento de sua câmara quente, podendo esta ser geotérmica, solar, nuclear ou qualquer outra fonte de calor disponível. Esta possibilidade lhe dá pontos ao poder ser aplicado em sistemas diferenciados, como reaproveitador térmico.

Contando com dimensões e peso reduzido, o desgaste interno dos componentes também é baixo e o uso de lubrificantes é simples devido aos produtos da combustão não os contaminarem, diferentemente dos motores de combustão interna.

Em contrapartida, o custo de fabricação é sua maior desvantagem. Inúmeras vezes teve o seu desenvolvimento defasado por este motivo já que as empresas desenvolvedoras optavam por trabalhar em motores mais baratos, os de combustão interna. O custo de um motor Stirling é duas vezes o de um motor Diesel de mesma potência, sendo que a maior parte deste custo é devido à fabricação de trocadores de calor com alta eficiência (FARIA, 2013).

Outra desvantagem marcante é a impossibilidade de poder responder à estímulos de forma rápida. Conforme retratado, o aumento de rotação do motor é muito lento para podermos aplicá-lo em situações que requerem uma resposta rápida, mas o torna ainda apropriado para funcionar em modelos híbridos, por exemplo.

## 4 Conclusão

Este trabalho buscou abordar de maneira concreta e objetiva a possibilidade de aplicação de motores pouco conhecidos que podem trazer grandes benefícios para a indústria automobilística híbrida em épocas de grande foco em questões ambientais. O motor Stirling foi escolhido como tema por se tratar de um motor de combustão externa, algo até então pouco explorado pela instituição e demais meios de informação e desenvolvimento.

Seguindo o raciocínio explorado, apesar de o motor Stirling ter suas claras desvantagens em relação aos motores de combustão interna, pode ser aplicado de diferentes formas a fim de neutralizar esses pontos negativos.

A utilização do motor Stirling nos veículos atuais não se mostra viável como única forma de fornecimento de energia para o automóvel, ou seja, como motor primário. Entretanto, como motor auxiliar em veículos híbridos HEV série (Veículo Elétrico Híbrido) onde tal configuração possui motor elétrico como forma primária de potência para o veículo e um motor gerador de eletricidade, a qualidade de “não-viável” do motor pode ser trabalhada de forma que sua aplicação gere bons resultados. Além disso, as qualidades ou características do motor Stirling são observadas cada vez mais de perto por desenvolvedores que acabam o aplicando em seus projetos.

Apesar das suas desvantagens, é nítido que a indústria vem desenvolvendo melhorias para esse motor que possui características ótimas para ser utilizado em diversas aplicações. Dessa forma, é correto afirmar que, caso investimentos em larga escala forem aplicados em pesquisas e melhorias, sua utilização pode se tornar viável e a curto ou médio prazo pode-se iniciar uma aplicação em série nos veículos produzidos.

#### **4.1 Propostas Futuras**

- Elaborar mais pesquisas sobre a aplicação do motor na área automobilística, levantando dados diretamente de desenvolvedores;
- Introduzir o conceito apresentado neste trabalho na construção de um protótipo do ciclo Stirling;
- Equacionar o protótipo e simular sua aplicação em um HEV;
- Verificar, comparar e criar uma relação entre os valores de fabricação dos ciclos Stirling, Otto e Diesel;
- Verificação da possibilidade de aplicar o motor Stirling em algum outro sistema veicular.

## 5 Referências Bibliográficas

- [1] HIRATA, Koichi. **Schmidt Theory for Stirling Engines**. National Maritime Research Institute, 2009.
- [2] WALKER, G. **Stirling Engines**. Oxford University Press, 1980.
- [3] Dr. FARIAS, Reginaldo de Jesus Costa. **Notas de aula: Fênomenos de Transporte**. FATEC Santo André, 2011.
- [4] FARIA, Sérgio. **O Ciclo Termodinâmico Stirling**, 2013.
- [5] ŠKORPÍK, Jiří. **Stirling Engine and its Principles of Operation**. Disponível em <[http://www.transformacni-technologie.cz/en\\_stirlinguv-motor.html](http://www.transformacni-technologie.cz/en_stirlinguv-motor.html)>. Acesso em 23/04/2014.
- [6] TOUR, Oded. **Tour Engine Project Overview**. Disponível em <<http://www.touengine.com/>>. Acesso em 07/05/2014.
- [7] AGARWAL, P., MOONEY, R., and TOEPEL, R., **Stir-Lec I, A Stirling Electric Hybrid Car**. SAE Technical Paper 690074, 1969.
- [8] HIRATA, Koichi. **Stirling Overview**. Disponível em <[http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/index\\_e.html](http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/index_e.html)>. Acesso em 05/01/2014.
- [9] KAMEN, Dean. **DEKA Research and Development of Stirling Engines**. Disponível em <<http://www.dekaresearch.com/index.shtml>>. Acesso em 04/04/2014.
- [10] WHO, World Health Organization. **About Emissions**. Disponível em <<http://www.euro.who.int/>>. Acesso em 04/04/2014.
- [11] Robert Stirling Engine. **Robert Stirling Engine**. Disponível em <<http://www.robertstirlingengine.com/>> . Acesso em 03/03/2014.

- [12] CULLEN, Barry. **The Combined Otto and Stirling Cycle Prime-Mover-Based Power Plant**. Dublin Institute of Technology, 2011.
- [13] PUIG, T., NETO, E. **Motores Stirling**. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2005.
- [14] SILVA, Renan. **Projeto Motor Stirling**. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2008.
- [15] SCHULZ, Daniel. **Ciclo de Stirling**. UFRGS, 2009.
- [16] SORENSEN, Harry A. **Energy Conversion Systems**. 2004.
- [17] MOONEY, D. A. **Mechanical Engineering Thermodynamics**. 1957.