

# **O USO DO CICLO STIRLING NO APROVEITAMENTO DE FONTES TÉRMICAS**

**Jonas Cordeiro da Silva**

Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia. Av. Roraima, Cidade  
Universitária, prédio7. Santa Maria, RS. CEP 97105-900

**Prof. Ronaldo Hoffmann**

Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia. Av. Roraima, Cidade  
Universitária, Prédio7. Santa Maria, RS. CEP 97105-900

## **INTRODUÇÃO**

A idéia principal deste estudo é mostrar, por uma ampla revisão de literatura, a grande aplicabilidade do ciclo termodinâmico Stirling, especialmente na geração distribuída e/ou isolada de energia. São poucas as informações que se tem sobre pesquisas com este ciclo termodinâmico em universidades brasileiras; há a necessidade de desenvolvimento de pesquisas, por brasileiros, para casos verdadeiramente voltados a nossa realidade de uso racional, mais eficiente e com aproveitamento local de diversas fontes térmicas primárias.

O ciclo termodinâmico Stirling permite a construção de motores que podem funcionar a partir de uma fonte de calor qualquer. As pesquisas são recentes em todas as partes do mundo, atualmente há algumas empresas se especializando na fabricação dos motores Stirling; há até mesmo, pesquisas que desenvolvem motores que simplesmente operam a partir de uma fonte sonora.

Os motores Stirling têm, nas suas várias configurações, basicamente dois lados ou partes. A primeira é a parte quente e a outra é a parte fria. Esta divisão ocorre devido ao estado do gás ou fluido de trabalho durante o ciclo termodinâmico, na sua expansão e compressão, absorvendo e liberando calor.

O ciclo Stirling, no seu lado quente, aproveita a energia térmica (calor) de outra fonte, que pode ser proveniente da queima de algum combustível ou de certas quantidades de calor rejeitadas em outros ciclos, como por exemplo, os condensadores das termoelétricas, ou o escapamento dos automóveis. A partir desse calor, o ciclo Stirling é capaz de produzir trabalho, que pode ser aproveitado para a geração de energia e também pode funcionar como uma geladeira, em substituição aos compressores selados atuais. A parte fria do motor Stirling é o congelador (evaporador dos atuais - ciclo Rankine). Algumas empresas estão desenvolvendo refrigeradores e caixas térmicas que funcionam a partir da queima de gás e também a partir da energia solar.

Apesar de as pesquisas de aplicações serem recentes, o ciclo Stirling, como concepção em si, é bastante antigo. Em 1816, o engenheiro escocês Robert Stirling criou um modelo de um motor que utiliza um determinado volume de um gás qualquer, que é aquecido externamente, sendo forçado a entrar numa câmara de volume maior que o inicial, onde o gás pode expandir-se livremente. A energia desta expansão pode ser usada para mover motores, gerar energia, ou outra aplicação que se desejar.

Ou, como foi usado em 1873, para refrigeração e/ou aquecimento, absorvendo calor no estágio de compressão e liberando trabalho ou mais calor na fase de expansão. Nesta época foram criados alguns protótipos com uso do ciclo Stirling.

Em breve, espera-se que os motores de combustão interna, que trabalham com a queima de alguns derivados de petróleo na forma líquida, entrem em desuso, devido à viabilização do ciclo Stirling e outros ciclos. Outro contemporâneo do Stirling, William Rankine, criou um ciclo que foi mais aceito para o uso na refrigeração por causa do advento dos fluidos refrigerantes, como os CFC's ou freons e outros líquidos refrigerantes.

Contudo, nos últimos anos do século passado, as inovações proporcionaram um aumento de eficiência na geração de médias potências com menores investimentos. O que possibilita essa redução nos custos é a significativa eficiência do ciclo Stirling, alcançada sem o uso de flúor carbonos como fluido de trabalho.

Refrigeradores Stirling incorporam ao motor o uso de “pistão livre” (denominados internacionalmente de: *Stirling Free-Piston*) e o uso de hélio ou nitrogênio, por exemplo, em vez de CFC's e HFC's, o que é muito bem visto, tanto que as grandes corporações estão cada vez mais usando e desenvolvendo esta tecnologia. Os grandes fabricantes de veículos automotivos, como a *Daimler Chrysler Corp.*, são os principais responsáveis pelo desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia Stirling para uso na refrigeração.

Os motores Stirling estão sendo estudados, quanto a sua viabilidade para a geração de energia elétrica, por causa de sua eficiência, que é considerada por muitos como a melhor em relação a outros métodos de geração e, principalmente, quando se deseja o uso alternativo aos combustíveis fósseis.

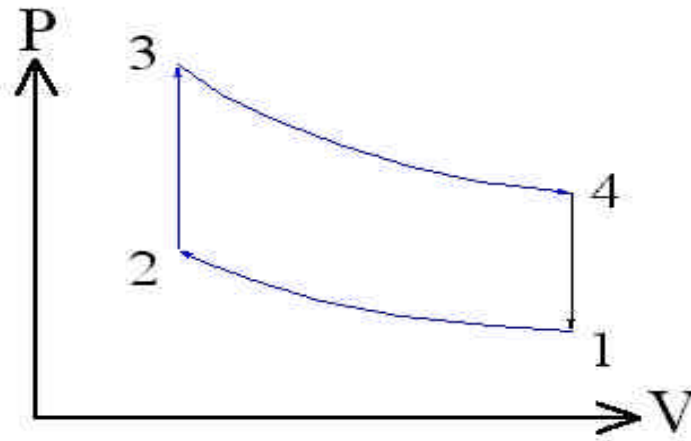
Habitualmente, o ciclo mais utilizado (e por isso mais estudado) nos refrigeradores domésticos, por exemplo, é o ciclo Rankine. Para estes casos, o ciclo Stirling pode ser usado como alternativa, atuando com mais eficiência e de maneira ecológica se comparado com os refrigeradores que ainda utilizam CFC's ou HFC's.

O ciclo Stirling pode também ser usado em outras aplicações, como no caso da utilização de um motor para obtenção de trabalho mecânico, ou energia cinética, que pode ser convertida em energia elétrica. Este motor pode operar a partir de uma fonte térmica, que normalmente está sendo desperdiçada ou eliminada por outro processo qualquer. Portanto, o motor Stirling pode estar convertendo algo, normalmente “perdido”, em trabalho útil ou energia elétrica.

Atualmente estão sendo desenvolvidos diversos estudos que objetivam projetar e fabricar motores operando segundo o ciclo termodinâmico Stirling, como motores de “pistão-livre” e, até mesmo, motores que funcionam por meio de vibrações provocadas por ondas sonoras, os chamados motores acústicos.

## O CICLO TERMODINÂMICO STIRLING

A figura a seguir representa o funcionamento do ciclo Stirling, com suas diversas fases.



**Figura 1 - Diagrama PXV do ciclo Stirling**

Onde:

- 1-2 – Compressão isotérmica (na qual há também rejeição de calor).
- 2-3 – Calor é transferido ao fluido de trabalho a volume constante.
- 3-4 – Expansão isotérmica (há também transferência de calor ao fluido de trabalho).
- 4-1 – Calor é rejeitado a volume constante.

## O MOTOR STIRLING

O motor Stirling é um motor térmico que trabalha a partir da energia proveniente da expansão e contração de um gás. De acordo com a lei dos gases ideais, que relaciona as propriedades do gás: temperatura (T), pressão (P) e volume (V) com o número de moles (n), temos o seguinte:

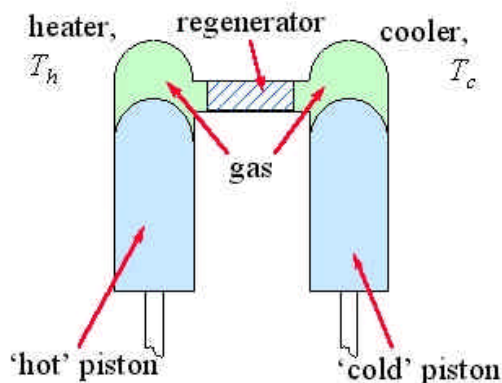
$$PV = nRT$$

onde R é a constante universal dos gases.

Ou seja, todo ciclo termodinâmico envolve transformações com a variação de uma destas três grandezas fundamentais dos gases, que podem ser relacionadas de acordo com a equação.

A chamada configuração “alfa” (figura 2) do motor Stirling é um dos três principais arranjos espaciais para o ciclo Stirling e, provavelmente, a mais fácil de se compreender. É também a configuração mais adequada para o uso com motores automotivos. A configuração alfa se caracteriza por um arranjo simples de dois cilindros em separado que são conectados em série por um aquecedor, um regenerador e um arrefecedor ou *cooler*.

É claro que essa descrição se constituiu na configuração mais básica e simples do ciclo Stirling, mas existem motores com configuração alfa de multicilindros. Para o entendimento do ciclo é mais fácil utilizar-se a configuração apresentada.



**Figura 2 - Configuração "alfa" do motor Stirling (fonte: Batchelor et al)**

Os seguintes componentes fazem parte deste arranjo:

- Regenerador: este componente do motor é usado para “armazenar” o calor durante parte do ciclo e devolvê-la ao gás durante o restante do ciclo. A inclusão deste componente do motor Stirling aumenta o rendimento, pois com o seu uso o ciclo se torna mais próximo do teórico. Desta forma as transformações ocorrem em temperaturas menos variáveis. Então, o regenerador é um trocador de calor composto por uma matriz de tubos ou um metal poroso, ou ainda, simplesmente uma cadeia ou labirinto de finas placas de metal na qual as paredes do metal (aletas) é que trocam calor com o gás.

- Fluido de trabalho: vários tipos de gases podem ser utilizados, a seleção adequada do gás depende principalmente de custo e eficiência. O gás é completamente isolado das partes móveis do motor em suas câmaras e devem ser consideradas as pressões ideais de trabalho, que variam conforme o gás.
- Pistões: na configuração alfa mais simples há dois pistões. Cada qual age no “lado quente” do motor ou no “lado frio”. São ligados a um virabrequim ou um sistema de alavancas, que determina o tempo necessário de atuação para o ideal fluxo de gás no motor Stirling.
- Aquecedor e *cooler*: o aquecimento e o arrefecimento do gás devem ocorrer em partes do ciclo. Para aquecer o gás várias fontes de calor podem ser usadas. A queima de um combustível, por exemplo, fornece calor ao gás de trabalho que pela expansão retira calor do *cooler*, por isso tem-se visivelmente o lado quente do motor e o lado frio.

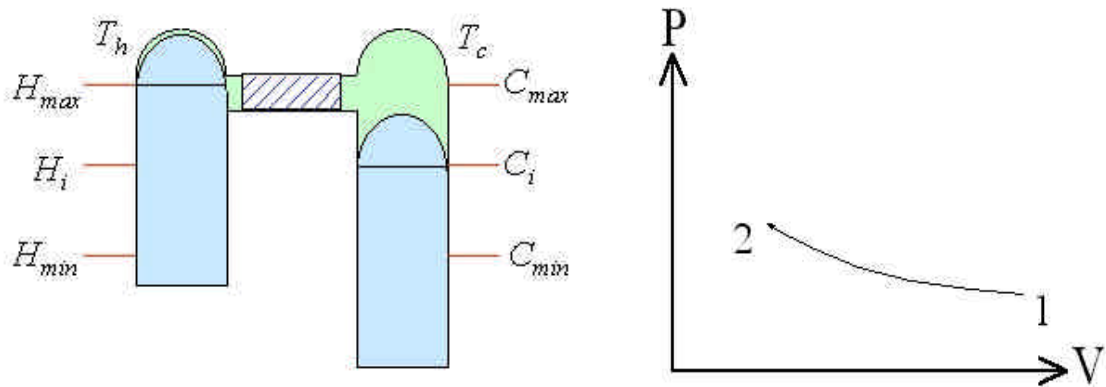
### COMO FUNCIONA O MOTOR

O “ciclo” é composto por quatro processos termodinâmicos seqüenciais (ciclo termodinâmico ideal). Cada fase do ciclo corresponde a uma transformação termodinâmica (processo) do fluido de trabalho (gás). Na realidade as fases não se processam isoladamente, o funcionamento aqui descrito é o teórico. As fases são listadas em ordem, e são válidas para um motor de configuração “alfa”, conforme esquema, com o respectivo gráfico pressão-volume ao lado.

Serão usadas as denominações: “pistão frio” para se designar o pistão do lado frio do motor da configuração já apresentada, e “pistão quente” para o pistão do lado que trabalha com as temperaturas mais elevadas. As figuras representam a fase final da transformação.

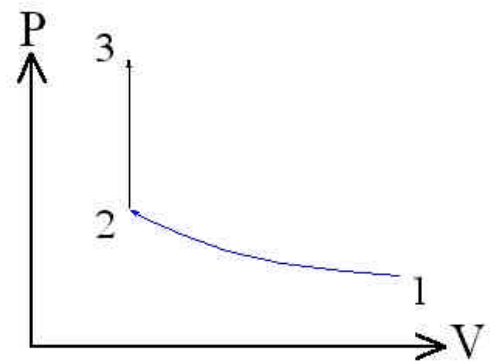
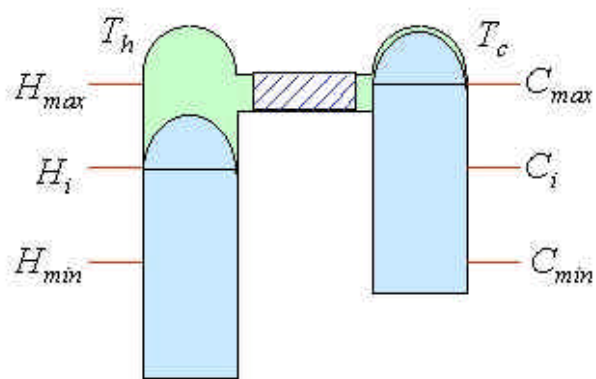
#### 1. Compressão isotérmica (temperatura constante)

O pistão frio se move para cima até um ponto intermediário ( $C_i$ ), comprimindo o gás de trabalho, e o calor produzido pela compressão é simultaneamente removido.



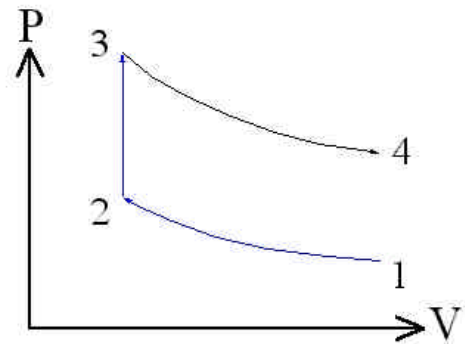
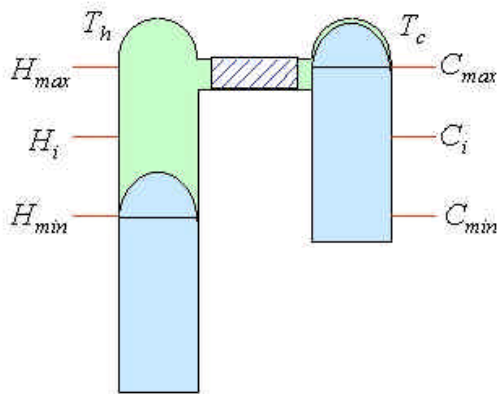
#### 2. Aquecimento isovolumétrico (volume constante)

O pistão do lado frio continua se movendo para cima, do ponto intermediário ( $C_i$ ) até  $C_{max}$  enquanto o pistão quente desce até o ponto intermediário ( $H_i$ ) o que faz com que o gás atravesse o regenerador. Passando pelo regenerador o gás sofre um acréscimo de temperatura, pois o regenerador está numa temperatura maior do que  $T_c$ . Com o volume constante este acréscimo na temperatura causa um aumento da pressão.



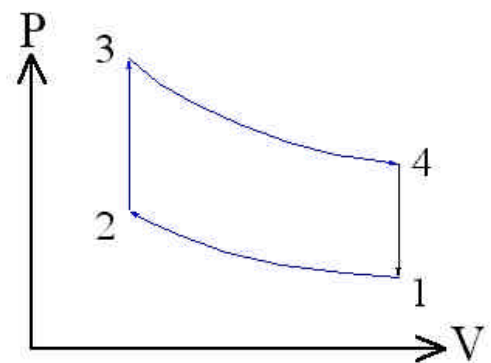
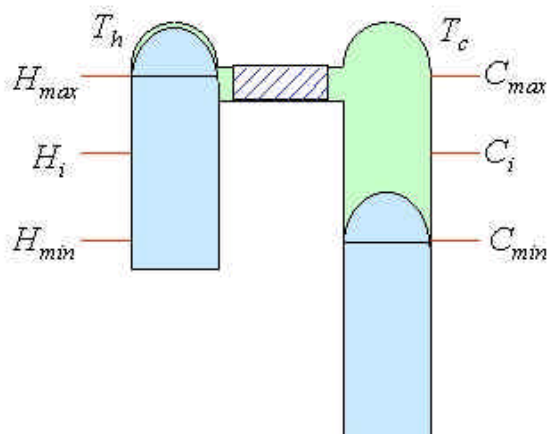
### 3. Expansão isotérmica

O gás é aquecido através de uma fonte de calor externa de temperatura ( $T_h$ ) e se expande. A expansão impulsiona o pistão quente até a posição inferior ( $H_{min}$ ).



### 4. Resfriamento isovolumétrico

O pistão quente retorna até a posição superior ( $H_{max}$ ) enquanto, simultaneamente, o pistão frio desce ( $C_{min}$ ) quando o gás passa novamente através do regenerador entregando calor que será usado novamente na fase dois. Esta transformação é a volume constante o que causa uma queda de pressão do gás. Esta fase completa o ciclo.



## VANTAGENS DO CICLO STIRLING

- **Capacidade de utilização de vários combustíveis:** Os motores Stirling podem utilizar qualquer tipo de combustível ou fonte de calor. Sendo variável o rendimento em função da fonte de energia. O motor pode funcionar sem a utilização de combustíveis fósseis;
- **Funcionamento silencioso:** nos motores Stirling não há válvulas, nem muitos elementos móveis ou explosões periódicas, o que causa um baixíssimo nível de ruído e vibração;
- **Baixo desgaste interno e consumo de lubrificante:** os produtos da combustão não entram em contato direto com as partes móveis do motor (combustão externa). Por conseguinte, não há contaminação do lubrificante como nos motores Diesel. A maior dificuldade nos motores de combustão interna é efetuar a lubrificação dos pistões com perfeita vedação em temperaturas elevadas, já nos motores Stirling não há este problema, as temperaturas são menores e as paredes do motor podem ser refrigeradas o que permite inclusive o uso da água como lubrificante no lugar dos óleos;
- **Diferentes arranjos físicos:** os elementos essenciais num motor Stirling são: dois cilindros, um para expansão e o outro para compressão e três trocadores de calor. Estes, aparentemente componentes simples, podem ser dispostos de diversas maneiras possibilitando uma grande adequação ao espaço físico.

## DESVANTAGES DO CICLO STIRLING

- **Custo:** é a principal desvantagem sem dúvida alguma. O motor Stirling ainda é aproximadamente duas vezes mais caro se comparado a um motor Diesel de mesma potência. O que encarece a fabricação é a produção dos trocadores de calor ideais;
- **Perfeita vedação:** os motores Stirling necessitam de boa vedação das câmaras que contém o gás de trabalho para evitar a contaminação do gás de trabalho pelo lubrificante. O rendimento do motor é normalmente maior com altas pressões, conforme o gás de trabalho, porém quanto maior a pressão de trabalho maior é a dificuldade de vedação do motor. Como exemplo pode-se citar o uso de hidrogênio, um gás cuja molécula é de reduzido tamanho trabalhando em altas velocidade e pressão (20MPa).

## EFICIÊNCIA

Conforme já exposto, a eficiência do ciclo Stirling depende muito da pressão de trabalho e principalmente das temperaturas. A pressão e a temperatura são fatores limitantes na construção do motor. De fato, a construção de um motor que trabalha com pressões internas elevadas e com trocadores de calor exige atenção à vedação e à resistência mecânica, assim como, utilização de materiais especiais o que, sem dúvida, encarece o motor.

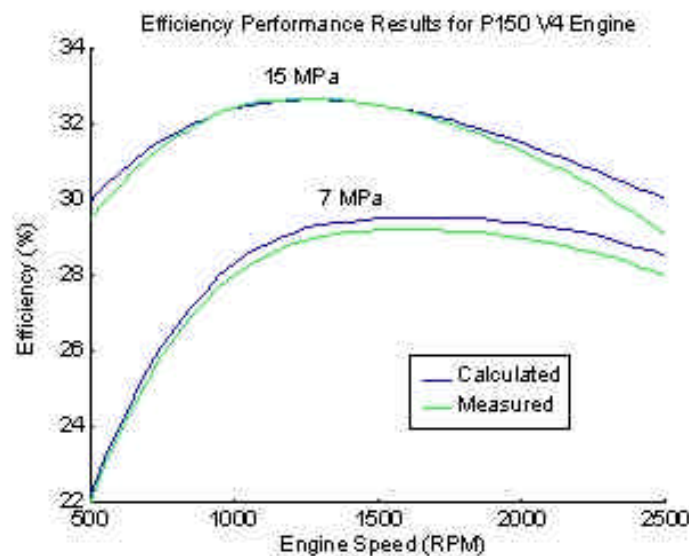
Devido a tudo isso se deve fazer uma análise econômica criteriosa levando-se em conta os custos iniciais e o tempo de retorno do investimento com a variação do rendimento.

A eficiência teórica dos ciclos reversíveis é dada pela seguinte equação:

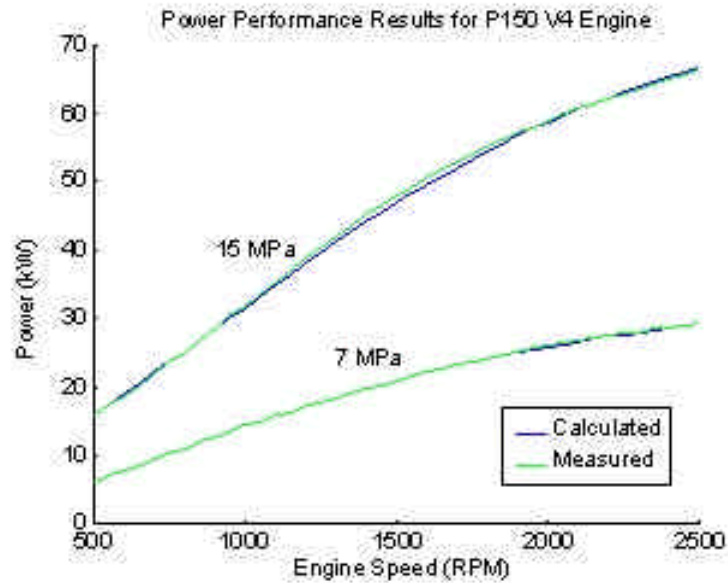
$$\text{Eficiência} = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

Onde  $T_q$  é a temperatura absoluta da fonte quente e  $T_f$  é a temperatura absoluta da fonte fria. A eficiência real é sempre menor que a teórica, mas pode-se perceber claramente a relação desta com a diferença entre as temperaturas  $T_q$  e  $T_f$ .

Batchelor et al (1997) apresenta a performance do motor "P150 v4 engine" através de dois gráficos:

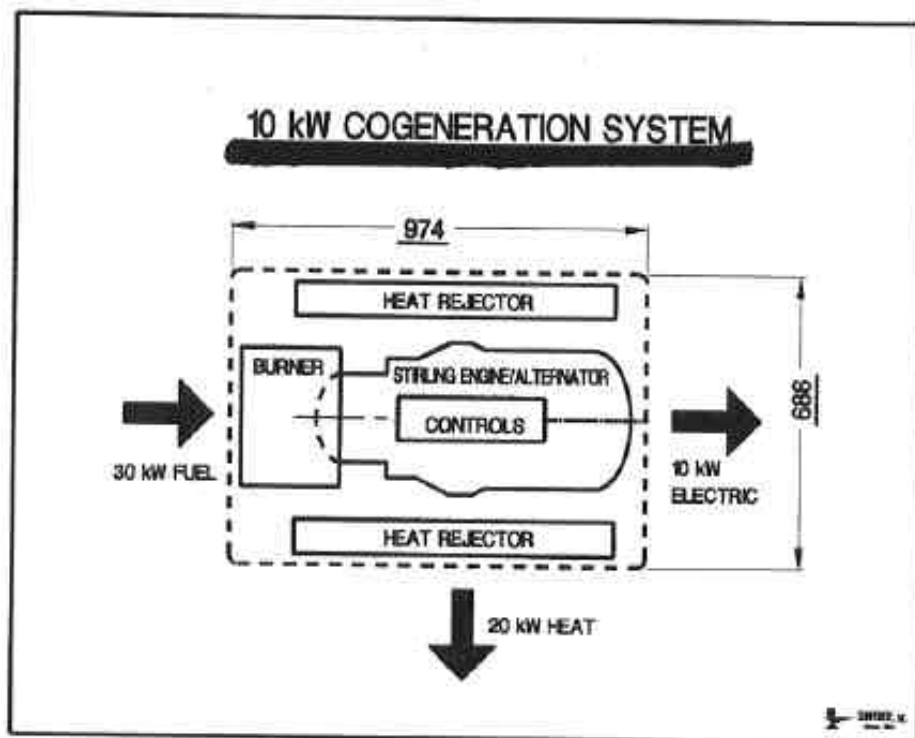


**Figura 3 – Variação da eficiência do motor "P150 V4" conforme pressão**



**Figura 4 – Variação da potência do motor "P150 V4" conforme pressão**

Beale & Chen (1992) apresentaram o seguinte balanço de energia para um motor Stirling de 10kW:



**Figura 5 - Balanço de energia para um sistema de co-geração de 10kW**

Beale & Chen (1992) ainda apresentam as características de um protótipo desenvolvido (tabela 1) pela *Sunpower Co.* e indicam algumas aplicações possíveis para tal protótipo e para tecnologia Stirling (tabela 2)

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| Potência             | 10kW(Max.)   |
| Saída                | 120V – C. A. |
| Eficiência           | 35%          |
| Comprimento          | 80cm         |
| Diâmetro             | 40cm         |
| Peso                 | 200kg        |
| Vida útil estimada   | 40000 horas  |
| Fluido de trabalho   | Hélio a 4Mpa |
| Temperatura “quente” | 670°C        |
| Temperatura “fria”   | 60°C         |
| Potência auxiliar    | <1kW         |

**Tabela 1 - Características de um Motor Stirling de 10kW para co-geração (Adaptada de Beale & Chen, 1992).**

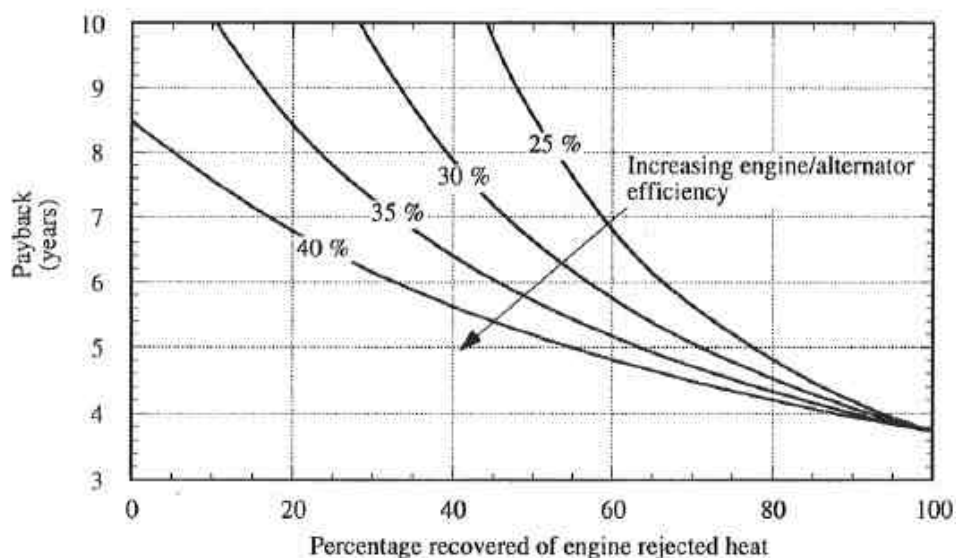
| Aplicação                         | Temperatura | Fonte de calor                          |
|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------------|
| Solar muito concentrada           | 670°C       | Luz do sol concentrada                  |
| Solar difusa                      | 300°C       | Luz do sol sem concentração             |
| Sistema de co-geração residencial | 500-720°C   | Gás natural, biomassa.                  |
| Co-geração agrícola               | 500-700°C   | Biomassa                                |
| Co-geração industrial             | 300-700°C   | Gás natural, biomassa, calor rejeitado. |
| Refrigeração industrial           | 700°C       | Gás natural                             |

**Tabela 2 - Algumas aplicações do motor de pistão-livre com as temperaturas e a fonte de calor (Sunpower Co.).**

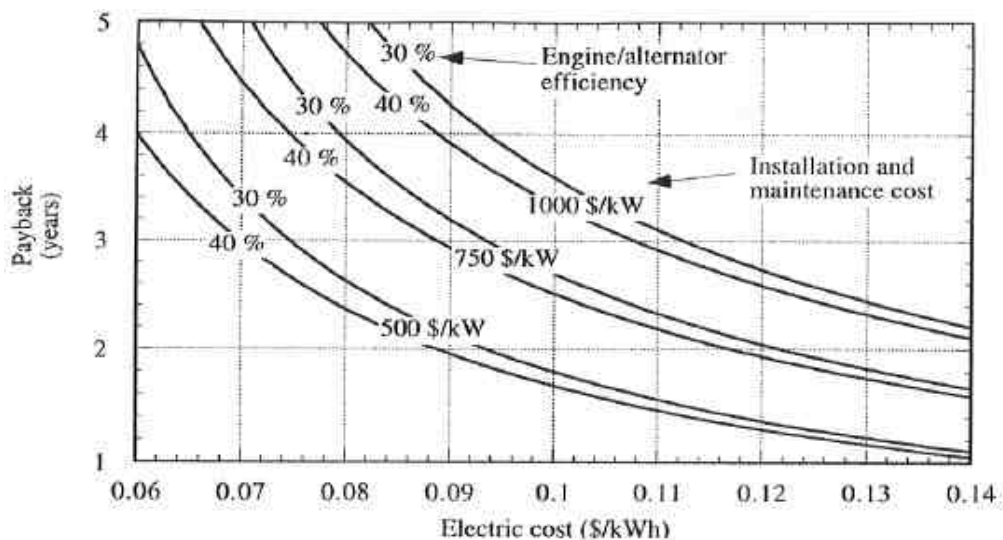
## AVALIAÇÃO ECONÔMICA

O tempo de retorno (*payback*) do investimento inicial depende, em muito, do valor do kWh no país em questão, assim como do custo da fonte de calor e, é claro, da eficiência do motor que esta relacionada com o custo inicial.

Com o intuito de realizar esta análise Lane & Beale (1996) apresentam alguns gráficos:



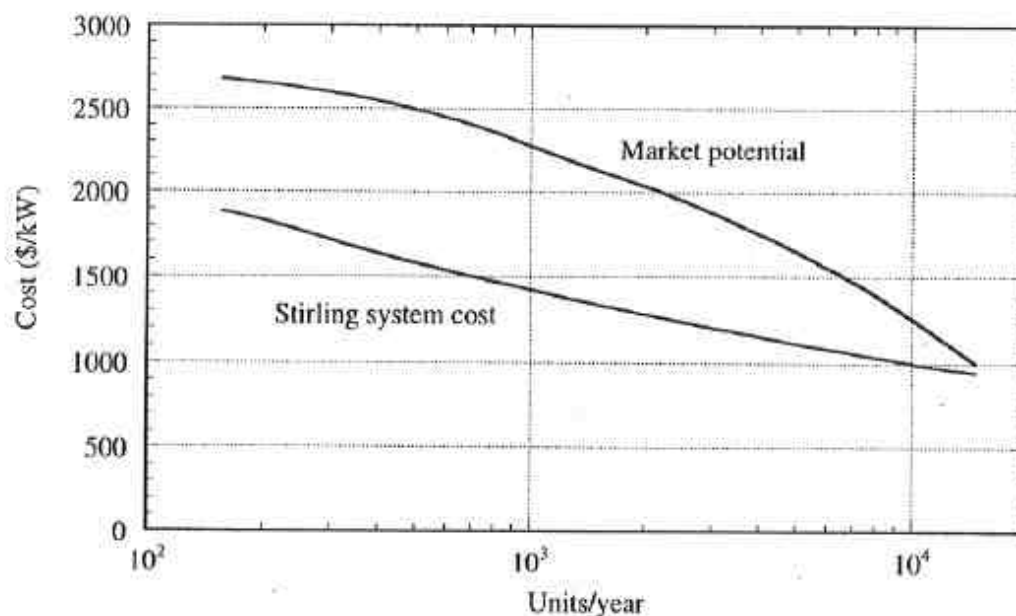
**Figura 6 – Tempo de retorno do investimento do sistema "Stirling Microcogen". Baseado nos preços de energia de 1995 para usuários domésticos nos EUA: gás natural-0,0206\$/kWh; energia elétrica-0,0841\$/kWh. Outros parâmetros: operação-4380h/ano (12h/dia); instalação e manutenção-\$1000.**



**Figura 7 – Tempo de retorno do investimento do sistema "Stirling Microcogen". Com a variação da eficiência e dos custos de manutenção e instalação com mesmos parâmetros anteriores**

O gráfico da figura 6 demonstra que o tempo de retorno do investimento cai com o aumento da eficiência do motor, como era esperado.

A variação da taxa de retorno sofre uma grande variação com a diferença dos custos de instalação/manutenção e uma menor variação com o aumento da eficiência do motor.



**Figura 8 – Potencial de mercado para o sistema " Stirling Micro-cogen" de 5kW e custo por kWh do sistema projetado de 10kW.**

Há um grande potencial de mercado que melhora com o acréscimo das vendas e a diminuição dos custos.

Além disso, o ciclo Stirling pode ser usado em outros casos além da geração de energia elétrica. Pode ser em casos associados com outros ciclos termodinâmicos, como cita Wood & Lane (2000) o uso combinado dos ciclos Rankine e Stirling, que neste caso funciona a partir da queima de um gás combustível (butano, propano, gás natural) e transmite somente potência para o sistema Rankine que funciona como bomba de calor, isto é, para aquecimento de ambientes ou água.

Para refrigeração o ciclo Stirling é usado na substituição do Rankine tradicional. Berchowitz & Shonder (1991) apresentam um refrigerador chamado de *Duplex Stirling* que funciona a partir da queima do gás natural.

O cálculo da aplicabilidade econômica depende do preço do gás natural. Berchowitz & Shonder (1991) apresentam uma tabela com a análise dos custos de acordo com a região dos Estados Unidos:

| Região dos EUA         | Custo do combustível (\$/kW) |             | Custo de operação (\$/hora)       |                                 |
|------------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|
|                        | Eletricidade                 | Gás Natural | TECUMESH*<br>AE 1390<br>290 Watts | DUPLEX<br>STIRLING<br>433 Watts |
| New England            | 0,100                        | 0,024       | 2,10                              | 1,05                            |
| Middle Atlantic        | 0,117                        | 0,022       | 2,45                              | 0,96                            |
| East North Central     | 0,090                        | 0,017       | 1,89                              | 0,75                            |
| West North Central     | 0,080                        | 0,016       | 1,67                              | 0,68                            |
| South Atlantic         | 0,088                        | 0,021       | 1,84                              | 0,92                            |
| East South Central     | 0,074                        | 0,017       | 1,55                              | 0,74                            |
| West South Central     | 0,083                        | 0,018       | 1,73                              | 0,76                            |
| Mountain               | 0,084                        | 0,017       | 1,76                              | 0,73                            |
| Pacific Contiguous     | 0,069                        | 0,018       | 1,43                              | 0,79                            |
| Pacific Non-Contiguous | 0,103                        | 0,014       | 2,15                              | 0,61                            |
| Média nos EUA          | 0,089                        | 0,018       | 1,86                              | 0,79                            |

\*Refrigerador que utiliza o ciclo Rankine.

**Tabela 3 - Análise comparativa dos custos de refrigeração. Adaptado de Berchowitz & Shonder (1997).**

No Brasil, talvez em breve, com a operação do gasoduto Brasil/Bolívia e seus ramais, além da ampliação do gasoduto que vem da Argentina, sejam econômicos os diferentes usos deste tipo de refrigerador, como os de porte maior em supermercados, açougues, centrais de refrigeração e câmaras frias.

## BIBLIOGRAFIA

1. ANGELINO, Gianfranco & INVERNIZZI, Costante. **Potential performance of real gas Stirling cycle heat pumps.** Int. J. Refrig. Vol.9, n°6, pp.390-399, 1996.
2. BATCHELOR, Nick et al. **The Stirling engine for cars.** Melbourne University. Melbourne, 1997.
3. BEALE, William & CHEN, Gong. **Small Stirling free-piston for cogeneration.** Sunpower. Athens, 1992.
4. BERCHOWITZ, David M. & McENTEE, Jarlath & WELTY, Steven. **Design and testing of a 40W Free-Piston Stirling cycle cooling unit.** 20<sup>th</sup> International Congress of Refrigeration. Sydney, 1999.
5. BERCHOWITZ, D. M. & KIIKKA, D. & MENNINK, B. D. **Recent advantages in Stirling cycle refrigeration.** Global Cooling BV and Sunpower Inc. Athens.
6. BERCHOWITZ, David M. & SHONDER, J. **Estimated size of a natural gas fired duplex Stirling for domestic refrigeration applications.** XVIII International Congress of Refrigeration. Montreal, 1991.
7. BERCHOWITZ, David M. **Stirling coolers for solar refrigerators.** Global Cooling Manufacturing. Athens, 1996.
8. BERCHOWITZ, David. **Stirling engines in developing countries.** Conference on Small Engines and Their Fuels in Developing Countries. Athens, 1984.
9. BOWMAN, L. & LANE, N. **Micro-sale biomass power.** Fourth Biomass Conference of the Americas, Biomass, a Growth Opportunity and Value add Products. Oakland, 1999.
10. KLOK, Geert. **Affordable refrigeration for developing countries.** Global Cooling Manufacturing. Athens, 2000.
11. LANE, Neill W. & BEALE, William T. **Stirling engines for gas fired micro-cogen and cooling.** Strategic Gas Forum. Athens, 1996.
12. LEMLEY, Brad. **Thunder in a bottle. (sound-wave driven engine).** Gale Group, 2000.
13. MORRISON, Gale. **Stirling Renewal.** American Society of Engineers. 1999.
14. OGUZ, Emre & OZKAD, Fatih & ARCELIK, A. S. **An experimental study on the refrigeration capacity and thermal performance of Free-Piston Stirling coolers.** Research and Development Center. Istanbul.

15. RIBBERINK, Hajo et al. **Stirling engine based micro co-generation system for single households.** Netherlands Energy Research Foundation ECN e Atag Verwarming BV. 1998.

16. WOOD, James G. & UNGER, Reuven & Lane, Neill. **A Stirling-Rankine fuel-fired heat pump.** 2000 International Compressor Engineering Conference, Purdue University. Sunpower. West Lafayette, 2000.