



DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM MOTOR STIRLING TIPO GAMA

por

Vinícius Guimarães da Cruz

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre.*

VINÍCIUS GUIMARÃES DA CRUZ

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM MOTOR
STIRLING TIPO GAMA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de
Pós – Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento as exigências para a obtenção do
Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel

*Ao meu pai, Luiz Francisco da Cruz, pela imprescindível
participação neste trabalho, e pelo suporte e
incentivo em todos os momentos da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luiz Francisco da Cruz e Maura Maria Guimarães da Cruz, por terem me dado todas as condições de realizar todos os meus sonhos;

A minha esposa, Juliana Abath Cananéa, pelo incentivo, companheirismo e apoio nos momentos mais importantes da minha vida;

Ao nosso filho, que acaba de nascer, Pedro Abath Cananéa C. Guimarães, que chega para abrilhantar ainda mais nossas vidas e aguçar nosso sentimento de luta e vontade de viver;

Aos meus irmãos Vitor Guimarães, Vagner Guimarães e Valentina Guimarães pelo apoio e confiança;

Ao Professor José Maurício Alves de Matos Gurgel, pela orientação e por todas as oportunidades que me foram dadas;

A todos os professores e funcionários do Laboratório de Energia Solar, pelo apoio e atenção dispensada, em especial, Hernandes (soldador), Diógenes e Sérgio.

Aos amigos que fiz durante o mestrado, Igor Cavalcanti da Silveira, Marco César Lima Cordeiro e Kleber Lima Cezar;

Ao professor Marcio Gomes da Silva, pela amizade e ensinamentos e aos doutorandos, Joselma Araújo de Amorim, Cícero Herbert Teixeira Andrade e Herbert Melo Vieira, pelo apoio de sempre.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM MOTOR STIRLING TIPO GAMA

RESUMO

O presente trabalho consiste no desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo gama. São apresentadas inicialmente as diferentes configurações deste tipo de motor (alfa, gama e beta), a definição do ciclo de Stirling e a modelagem matemática para cada configuração. Uma análise matemática é feita através da teoria de Schmidt, que é um método baseado na compressão e expansão isotérmica de um gás ideal, implementada em programa computacional permitindo determinar a dependência entre os parâmetros construtivos e de funcionamento do motor. A revisão bibliográfica contempla as principais configurações de motores Stirling e várias condições de funcionamento, alimentados por diversos tipos de combustíveis. A parte experimental do trabalho é a montagem de um protótipo de motor Stirling tipo gama sem regenerador tendo o ar como fluido de trabalho, utilizando resistências elétricas como fonte de calor e um fluxo de água a temperatura ambiente para o resfriamento do trocador de calor de compressão. Os testes do motor serão realizados a pressão atmosférica, para temperaturas de 100 a 600 °C e rotações de 100 a 400 rpm, os resultados são apresentados em gráficos e discutidos.

Palavras- chaves: Motor de Stirling, Motor de ar quente, Ciclo de Stirling, Teorema de Schmidt.

EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF A STIRLING ENGINE GAMMA TYPE

ABSTRACT

The current paper develops an experimental Stirling engine Gama type. Different settings of this type of engine are presented (alpha, beta and gamma), along with the Stirling Cycle Definition and the mathematical modeling for each setting. It's been Proceed a mathematical analysis based on the Stirling Theory, which is the method based upon the isothermical compression and expansion of an ideal gas, put to analysis by a computer software, determining the dependency between the engine's construction and functioning parameters. Bibliography used takes over the main Stirling engine settings and various working conditions, fed by a numerous types of fuels. The experimental part of the paper is assembling of a Stirling engine gamma type containing no regenerator, therefore, having the air as its working fluid, using electrical resistances as heat source, also a water jet at ambience temperature to cool down the compression and heat exchanger. Engine tests were performed at atmospheric pressure, temperatures from 100 to 600 °C, 100 to 400 rpm rotations. The results are presented in graphics and are questioned.

Key-words: Stirling Engine, Hot Air Engine, Stirling Cycle, Schmidt's Theory.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 MOTIVAÇÃO.....	11
1.2 OBJETIVO	12
1.3 DESCRIÇÃO DOS PRÓXIMOS CAPÍTULOS.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 O MOTOR STIRLING.....	26
2.1.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E CICLO TERMODINÂMICO.....	29
2.1.2 CLASSIFICAÇÃO CONFORME DISPOSIÇÃO DOS PISTÕES	32
2.2 TEOREMA DE SCHMIDT PARA MOTORES STIRLING.....	34
2.2.1 TEOREMA DE SCHMIDT PARA O MOTOR STIRLING TIPO ALFA.....	37
2.2.2 TEOREMA DE SCHMIDT PARA O MOTOR STIRLING TIPO BETA.....	40
2.2.3 TEOREMA DE SCHMIDT PARA O MOTOR STIRLING TIPO GAMA	43
2.2.4 ENERGIA, POTÊNCIA INDICADA E EFICIÊNCIA	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 ESCOLHA DO MATERIAL E DIMENSIONAMENTO	47
3.2 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO UMA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE 250 W	56
4.2 RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO DUAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS DE 250 W	57
4.3 RESULTADOS ADQUIRIDOS PELO TEOREMA DE SCHMIDT	61
4.4 COMPARAÇÃO COM OUTROS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COM OS RESULTADOS ADQUIRIDOS PELO MODELO MATEMÁTICO	63
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Reserva e produção mundiais de petróleo em 2004. Fonte: Olade – Organização Latino-Americana de Energia, 2005, apud Barros, 2005.....	11
Fig. 2.1 - Desenho esquemático com equipamento de teste, (KARABULUT, 1998) ..	15
Fig. 2.2 - Motor Stirling tipo alfa fabricado por Karabulut (1998)	16
Fig. 2.3 - Variação da potência em função da pressão para diferentes temperaturas da fonte quente. (Karabulut, 1998)	17
Fig. 2.4 - Variação da potência em função da temperatura da fonte quente para diferentes pressões(Karabulut, 1998)	17
Fig. 2.5 - Motor Stirling construído por Scollo a partir de um compressor de ar	18
Fig. 2.6 - Protótipo de motor Stirling desenvolvido por Tavakolpour, 2007.	19
Fig. 2.7 - Trabalho total por ciclo em função do anglo de fase (TAVAKOLPOUR, 2007)	19
Fig. 2.8 - Variação da pressão no interior dos cilindros (TARAWNEH, 2010)	20
Fig. 2.9 - Variação da temperatura no interior dos cilindros (TARAWNEH, 2010)	21
Fig. 2.10 - Esquema do motor Stirling dividido em 14 volumes de controle, (ATAER, 2004).....	21
Fig. 2.11 - Variação do COP e da temperatura da parede do espaço de expansão com a pressão (ATAER, 2004)	22
Fig. 2.12 - Protótipo do motor Stirling desenvolvido por Manrique et al. (2009)	23
Fig. 2.13 – Teste realizado com gás e com biomassa (MANRIQUE et al., 2009).....	23
Fig. 2.14– Motor Stirling tipo beta desenvolvido por Cinar et al. (2004).....	24
Fig. 2.15 – Torque e potência x velocidade a 800 °C (CINAR et al., 2004).....	25
Fig. 2.16 –Torque e potência em função da velocidade à 900 °C (CINAR et al., 2004)	26
Fig. 2.17 – Torque e potência x velocidade a 1000 °C (CINAR et al., 2004).....	26
Fig. 2.18 - Motor Original de Robert Stirling	28
Fig. 2.19 - Representação do ciclo ideal de Stirling	30
Fig. 2.20 Esquema básico do motor Stirling tipo Alfa (PAULA, 2007).....	33
Fig. 2.21 - Esquema básico de funcionamento do motor Stirling tipo Beta	33
Fig. 2.22 - Esquema básico do motor Stirling tipo Gama	34
Fig. 2.23- Esquema de um motor Stirling tipo alfa (HIRATA, 1997)	37
Fig. 2.24 -Esquema de um motor Stirling tipo Beta (Hirata, 1995)	41
Fig. 2.25 -Esquema de um motor Stirling tipo Gama (Hirata, 1995)	43

Fig. 3.1 - Conjunto de peças padronizadas utilizadas no protótipo.....	48
Fig. 3.2 – Variação da potência em função da temperatura do trocador de calor de aquecimento obtida por Schmidt	48
Fig. 3.3 - Cilindro do deslocador com trocadores de calor.....	49
Fig. 3.4 - Acoplamento do virabrequim ao pistão deslocador.....	50
Fig. 3.5 - Pistão deslocador	51
Fig. 3.6 - Protótipo do Motor Stirling completo.....	52
Fig. 3.7 - Desenho esquemático da nova montagem do motor	52
Fig. 3.8 - Montagem do motor Stirling com os dois pistões acoplados ao mesmo pino	53
Fig. 3.9 - Resistências elétricas utilizadas como fonte de calor	54
Fig. 3.10 - Posicionamento da resistência elétrica no trocador de calor	54
Fig. 3.11 - Desenho esquemático do Freio de Prony	55
Fig. 3.12 - Vista geral da bancada de testes do motor Stirling.....	55
Fig. 4.1 – Variação da temperatura da fonte quente em função do tempo de funcionamento com uma resistência elétrica (temperatura ambiente 27° C).	56
Fig. 4.2 - Variação da rotação em função da temperatura do aquecedor com uma resistência (temperatura ambiente 27 ° C)	57
Fig. 4.3 – Variação da temperatura da fonte quente em função do tempo de funcionamento com duas resistências elétricas (temperatura ambiente 30° C).....	58
Fig. 4.4 – Variação da rotação em função da temperatura do aquecedor com duas resistências.....	58
Fig. 4.5 – Variação da potência em função da temperatura do trocador de calor de aquecimento.....	59
Fig. 4.6 – Variação do torque e da potência em função da velocidade de rotação.....	60
Fig. 4.7 – Diagrama pressão x volume obtido por Schmidt	61
Fig. 4.8 – Variação da potência em função da temperatura da fonte quente obtida por Schmidt (400 rpm).....	61
Fig. 4.9 – Variação da potência em função da rotação obtido por Schmidt para uma temperatura de 600 °C	62
Fig. 4.10 – Variação do torque e potência em função da velocidade de rotação com temperatura de 800 °C (CINAR, 2004).....	63
Fig. 4.11 – Variação da potência em função da pressão para diferentes temperaturas da fonte quente. (Karabulut, 1998)	64

Fig. 4.12 - Variação da potência em função da temperatura para diferentes pressões. (Karabulut, 1998)	64
Fig. 4.13 – Potência em função da temperatura da fonte quente obtida por Schmidt (400 rpm)	65

LISTA DE QUADROS

Quadro (2.1) - Especificações técnicas do motor fabricado por Karabulut (1998).....	16
Quadro (2.2) - Especificações do motor Stirling desenvolvido por Manrique et al. (2009)	24
Quadro (2.3) - Especificações do motor Stirling desenvolvido por Cinar et al. (2004)	25
Quadro (2.4) - Considerações usadas na teoria de Schmidt	35
Quadro (2.5) - Parâmetros utilizados na teoria de Schmidt.....	36
Quadro (3.1) – Parâmetros construtivos e de funcionamento obtidos através do teorema de Schmidt.....	49

SIMBOLOGIA

A	Área para Transferência de Calor	
c	Capacidade de Calor	kJ/kgK
C	Trocador de Calor de Resfriamento, Espaço de Compressão	
Dx	Ângulo de Fase	°
E	Espaço de Expansão	
EC	Energia Indicada de Compressão	J
EE	Energia Indicada de Expansão	J
EI	Energia Indicada J	
H	Trocador de Calor de Aquecimento (Heater)	
K	Condutividade Térmica kW / mK	
K	Cooler	
kWe	kW elétrico	
n	Rotação do Motor	rpm
P	Pressão	Bar
L	Potencia	kW
PC	Pressão no Espaço de Compressão	Bar

PC	Potência Indicada de Compressão	W
PE	Potência Indicada de Expansão	W
Pel	Potência Elétrica	kW
Pi	Potencia Indicada	W
Q	Taxa de Transferência de Calor	kW
R	Regenerador, Constante Universal dos gases	
s	Entropia	kJ/kgK
t	Temperatura Relativa	
T	Temperatura	°C
TC	Temperatura do Cooler, e no espaço de compressão	K
TE	Temperatura no Espaço de Expansão	K
TH	Temperatura do Aquecedor	K
v	Volume Morto Relativo	
VC	Volume Momentâneo do Espaço de Compressão	m ³
VDC	Volume Morto do Espaço de Compressão	m ³
VDE	Volume Morto do Espaço de Expansão	m ³
VE	Volume Momentâneo do Espaço de Expansão	m ³
VR	Volume do Regenerador	m ³
VSC	Volume Percorrido Pelo Pistão de Compressão	m ³
VSE	Volume Percorrido Pelo Pistão de Expansão ou de Deslocamento	m ³
X	Volume Morto Relativo	
W	Potência Mecânica	W

SUBSCRITOS

C	relativo ao volume de compressão, relativo ao Cooler
E	relativo ao volume de expansão
H	Relativo ao trocador de calor de aquecimento (Heater)
R	relativo ao regenerador

LETRAS GREGAS

η	Eficiência	
ρ	Densidade	Kg/m ³

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As energias alternativas têm se tornado uma nova tendência, sobretudo na geração de eletricidade, devido à necessidade de redução da emissão de poluentes. Os estudos, pesquisas e investimentos voltados para utilização de energias alternativas como eólica, de marés, de ondas oceânicas, energia solar, biomassa etc. vêm recebendo muita atenção na atualidade.

Com relação às 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 mineral por aproximadamente 200 anos (MATTOZO, 2001 apud BARROS, 2005).

Entretanto, a principal fonte primária de energia utilizada atualmente continua sendo o petróleo, que contribuiu com 34,4% da produção total de energia primária no ano de 2003 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2005 apud BARROS, 2005). A Figura (1.1) apresenta as reservas mundiais de petróleo e a sua produção no ano de 2004.

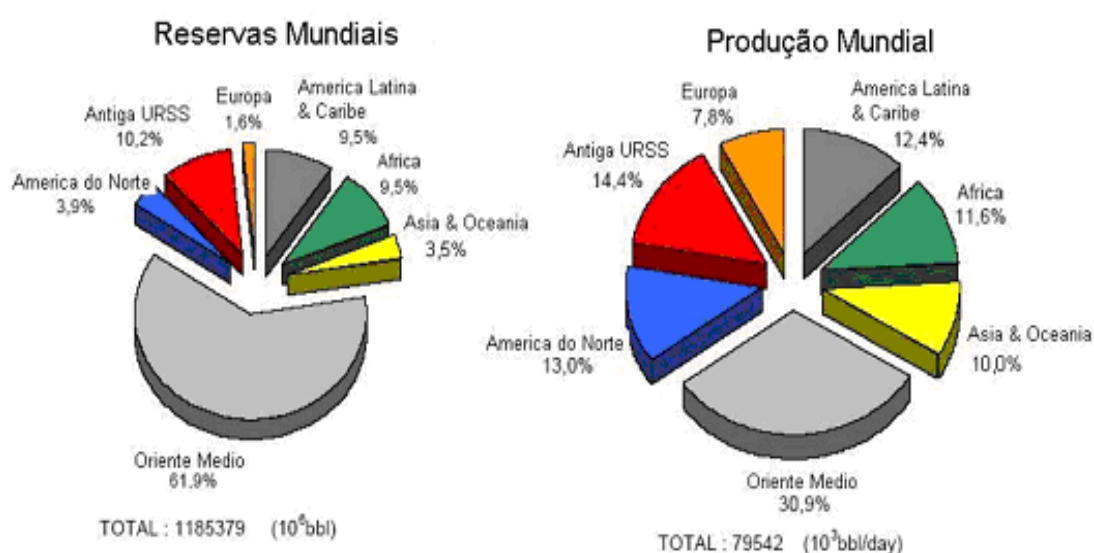


Figura (1.1) - Reserva e produção mundiais de petróleo em 2004. Fonte: Olade – Organização Latino-Americana de Energia, 2005, apud Barros, 2005.

A constante tentativa de diminuir a utilização de combustíveis fósseis e utilizar combustíveis alternativos reduzindo a emissão de poluentes motivou a retomada do interesse pelos motores Stirling, pois este tipo de motor necessita apenas de uma fonte de calor independentemente do tipo de combustível, podem alcançar alta eficiência e ser alimentados inclusive através da energia solar. Este interesse deu-se, também, pelo avanço de fatores como a tecnologia dos materiais, dos processos de fabricação e sistemas de selagem, fatores que inviabilizaram os motores Stirling levando-os ao desaparecimento comercial e desinteresse pela tecnologia no início do século XX (BARROS, 2005).

Outra motivação importante na retomada dos motores Stirling é sua capacidade de converter energia térmica em mecânica sem explosão, como no caso do motor de combustão interna, levando a uma operação silenciosa e limpa, que são essenciais para aplicações especiais, tais como operações militares e usos médicos (TLILI, TIMOUMI, NASRALLAH, 2006).

O motor Stirling representa uma alternativa para eletrificação de comunidades remotas e que não são amparadas pela rede elétrica convencional, pois podem operar alimentados através de qualquer fonte de calor. Ainda existem diversas limitações para o desenvolvimento desse tipo de motor, porém se as restrições operacionais forem resolvidas, diferentes opções de projetos viáveis podem ser encontradas (SHENDAGE et al., 2010).

Em relação à eficiência térmica, o motor Stirling pode superar a de outros sistemas como, por exemplo, os de ciclo de Rankine e pode revelar-se mais barato em comparação com outras unidades solares fotovoltaicas (SHENDAGE et al., 2010).

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento experimental de um protótipo de motor Stirling tipo gama sem regenerador utilizando ar como fluido de trabalho. Primeiramente serão obtidas as dimensões dos componentes do motor através do teorema de Schmidt utilizando como dados de entrada os parâmetros de funcionamento normalmente utilizados em motores Stirling. O teorema de Schmidt também será utilizado para verificação da relação entre os parâmetros construtivos e de funcionamento do motor, estas relações são em seguida confrontadas com os dados experimentais obtidos.

1.3 DESCRIÇÃO DOS PRÓXIMOS CAPÍTULOS

O capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica mostrando o projeto e a construção de várias configurações de motores Stirling utilizando diferentes tipos de fluidos de trabalho e diferentes fontes de calor, bem como os dados experimentais obtidos. Este capítulo também descreve o funcionamento do motor Stirling, o ciclo termodinâmico e a classificação conforme disposição dos pistões bem como o teorema de Schmidt para as configurações Alfa, Beta e Gama. São apresentados os gráficos relacionando os principais parâmetros do motor, gerados a partir do teorema, e o diagrama pressão x volume.

O capítulo III apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento experimental do protótipo e a descrição da bancada de ensaios.

Os resultados, discussões e a comparação com outros resultados são mostrados no capítulo IV.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas relacionadas com fontes de energia renováveis visando diminuir a utilização de combustíveis fósseis vêm sendo intensificadas devido ao aumento da demanda por energia associado ao crescimento dos problemas ambientais.

A produção mundial de energia primária em 2003 foi aproximadamente 10579 megatoneladas de petróleo equivalente, segundo dados da IEA (International Energy Agency, 2005). A maior parte desta energia (86,5%) é derivada de fontes não renováveis – carvão mineral, gás natural, petróleo e energia nuclear. O restante é proveniente de fontes renováveis como a biomassa, energia hidrelétrica, geotérmica, solar e eólica (BARROS, 2005).

O desenvolvimento de motores que podem ser alimentados a partir de fontes de energia renováveis é de extrema importância para o aumento da utilização deste tipo de energia. Os motores Stirling são alvo de muitos estudos e pesquisas científicas devido a sua capacidade de uso eficiente de energia proveniente de qualquer fonte de calor. Assim, o desenvolvimento e investigação de motores Stirling tornam-se aspectos importantes para muitos institutos científicos e empresas comerciais.

Utilizando esta tecnologia foram construídos motores em muitas formas e tamanhos e várias pesquisas vêm sendo realizadas em diferentes configurações, alimentados por diferentes tipos de energia.

Tlili et al. (2008) apresentaram um estudo de um sistema de potência baseado no motor Stirling tendo como fonte de alimentação um prato solar com concentração média de operação ressaltando as considerações de projeto a serem tomadas para desenvolver um motor com diferença média de temperatura para aplicação solar. Durante a fase inicial, os parâmetros críticos do projeto são determinados de acordo com o modelo dinâmico, com perdas de energia e queda de pressão em trocadores de calor, estes parâmetros são usados durante a fase de otimização do projeto, a fim de estabelecer um modelo analítico completo para o motor. Após a otimização, para dado valor de diferença de temperatura, frequência de operação e volume morto há um valor ideal de cilindrada em que a potência é máxima.

Karabulut et al. (1998a) projetaram e fabricaram um motor Stirling tipo- β para temperaturas relativamente baixas. O bloco do motor foi utilizado como reservatório

para fluido de trabalho pressurizado, os dados experimentais apresentados foram obtidos através de ensaios utilizando ar como fluido de trabalho, a extremidade quente do cilindro deslocador foi aquecida através de uma chama de GLP mantendo uma temperatura constante de 200 °C por todo o período de testes e a extremidade fria foi resfriada através da passagem de água a 27 °C. O motor foi testado em várias pressões partindo da atmosférica até 4,6 bar obtendo a potência máxima de 51,93 W na pressão de 2,8 bar com velocidade de 453 rpm. A figura (2.1) mostra o desenho esquemático do motor juntamente com o equipamento de teste. As especificações do motor fabricado por Karabulut (1998) pode ser observadas no quadro (2.1).

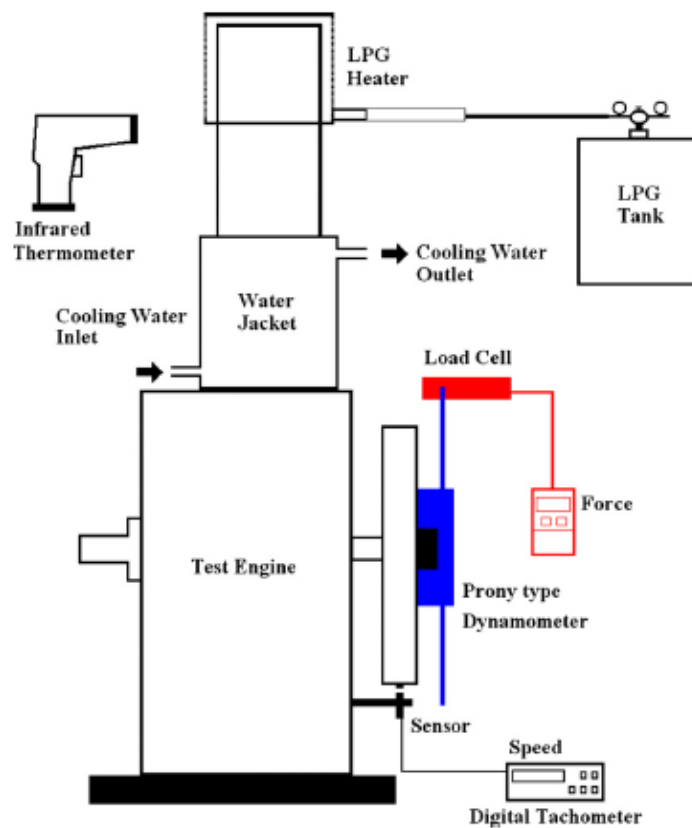


Figura (2.1) - Desenho esquemático com equipamento de teste (KARABULUT, 1998)

Quadro (2.1) Especificações técnicas do motor fabricado por Karabulut (1998)

Parameters	Specification	
Engine type	β	
Power piston	Bore $\times$ stroke (mm)	70 $\times$ 60
	Swept volume (cc)	230
Displacer	Bore $\times$ stroke (mm)	69 $\times$ 79
	Swept volume (cc)	295
Working fluid	Air	
Cooling system	Water cooled	
Compression ratio	1.65	
Total heat transfer area of the displacer cylinder (cm ²)	1705	
Maximum engine power	51.93 W (at 453 rpm)	

Karabulut et al. (1998b) fabricaram e testaram um motor Stirling tipo alfa, figura (2.2) utilizando ar como fluido de trabalho e 260 cm³ de cilindrada. As características do motor foram obtidas para temperaturas entre 600 °C a 1100 °C e pressões de 1 a 4 bar e os resultados apresentados em diagramas. A potência máxima de saída, 65 W, foi obtida a 1100 °C e 2,5 bar, como pode ser observado na figura (2.3). O calor foi fornecido por uma fornalha elétrica com capacidade para produzir uma temperatura de 1500 °C, a resistência elétrica foi inserida através de uma janela aberta na parede da fornalha e o resfriamento foi feito através de um fluxo de água a 20 °C. A figura (2.4) mostra a variação da potência em função da temperatura.



Figura (2.2) - Motor Stirling tipo alfa fabricado por Karabulut (1998)

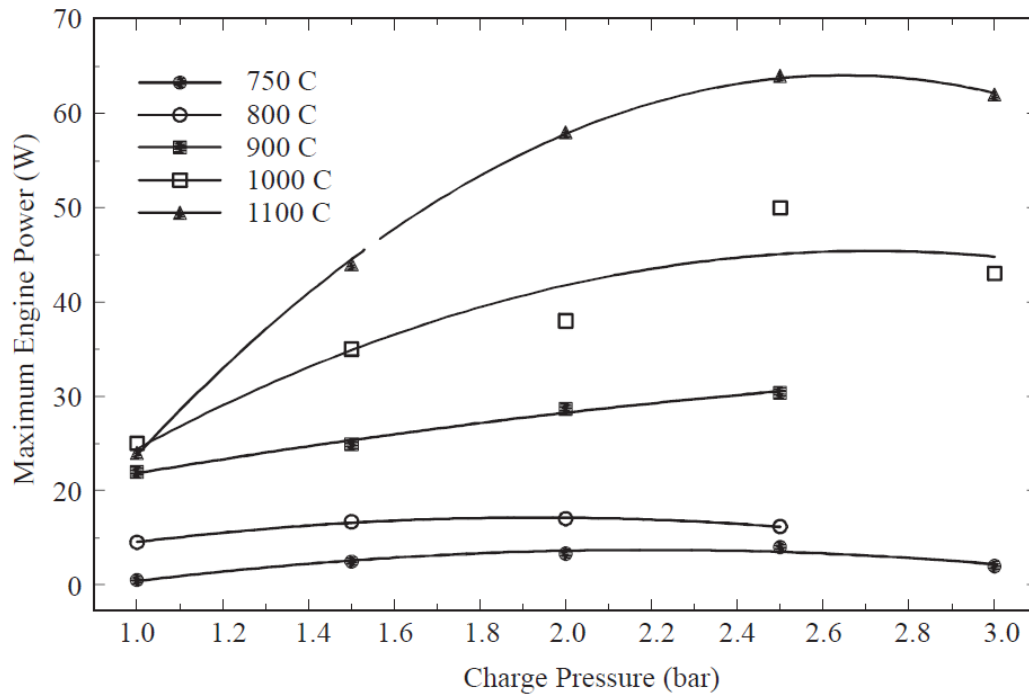


Figura (2.3) - Variação da potência em função da pressão para diferentes temperaturas da fonte quente (KARABULUT, 1998)

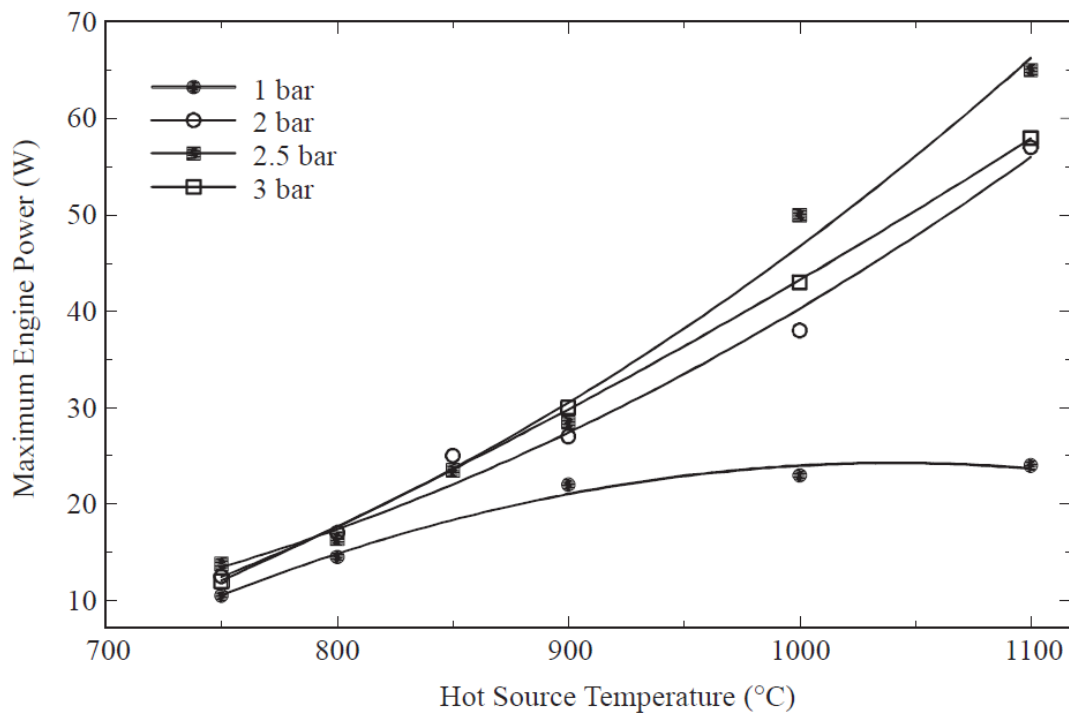


Figura (2.4) - Variação da potência em função da temperatura da fonte quente para diferentes pressões (KARABULUT, 1998)

Scollo et al. (2008) converteram um compressor de ar tipo-V usando a maioria de suas partes mecânicas, figura (2.5), isto foi decidido visando acelerar o projeto

mecânico e concentrar-se no projeto termodinâmico. A seleção do compressor a converter foi feita utilizando a equação 1 (equação de Beale), esta equação é uma correlação empírica encontrada na maioria dos motores Stirling construídos com sucesso.

$$P = N_B \cdot P_{ref} \cdot V_{sw} \cdot f \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde P é a potência do motor (W), N_B é o número de Beale (0,11-0,15), P_{ref} é a pressão média de referência do ciclo (bar), V_{sw} é o volume deslocado (cm^3) e f a frequência de operação (Hz). Os últimos três valores da equação estão disponíveis nas especificações técnicas dos compressores.

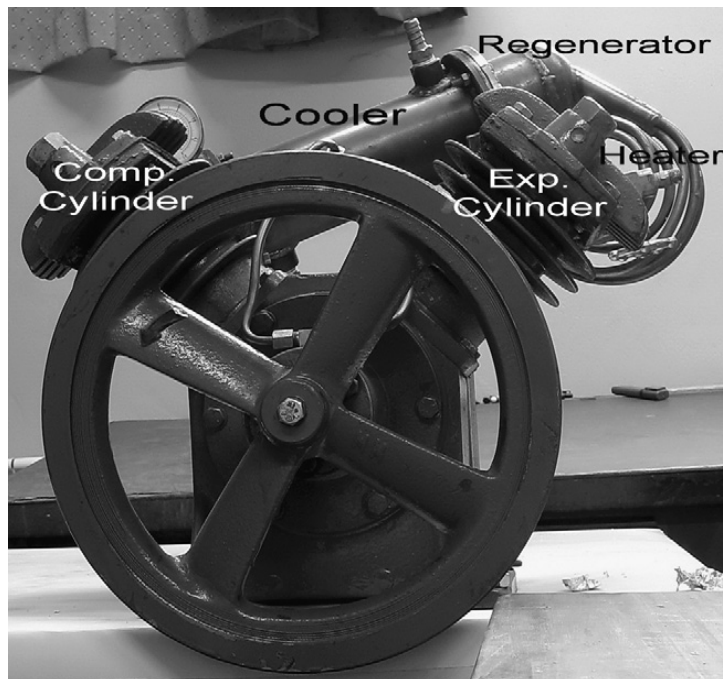


Figura (2.5)-Motor Stirling construído por Scollo (2008) a partir de um compressor de ar

Tavakolpour et al. (2008) modelaram, construíram e testaram um motor Stirling tipo gama com baixa diferença de temperatura, alimentado por energia solar. Um coletor solar foi utilizado como fonte de calor, figura (2.6), a concepção do sistema foi baseada numa diferença de temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os princípios da termodinâmica bem como a teoria de Schmidt foram adaptados para serem usados na modelagem do motor. Para simular o sistema, programas de computador foram desenvolvidos para analisar os modelos e os parâmetros otimizados do projeto do motor foram determinados. A taxa de

compressão otimizada foi computada como sendo 12,5 para aplicação solar com temperatura média do coletor de 100 °C e temperatura ambiente de 20 °C. Além da taxa de compressão foi otimizado o angulo de fase, analisando o trabalho por ciclo em função do angulo como mostra a figura (2.7).

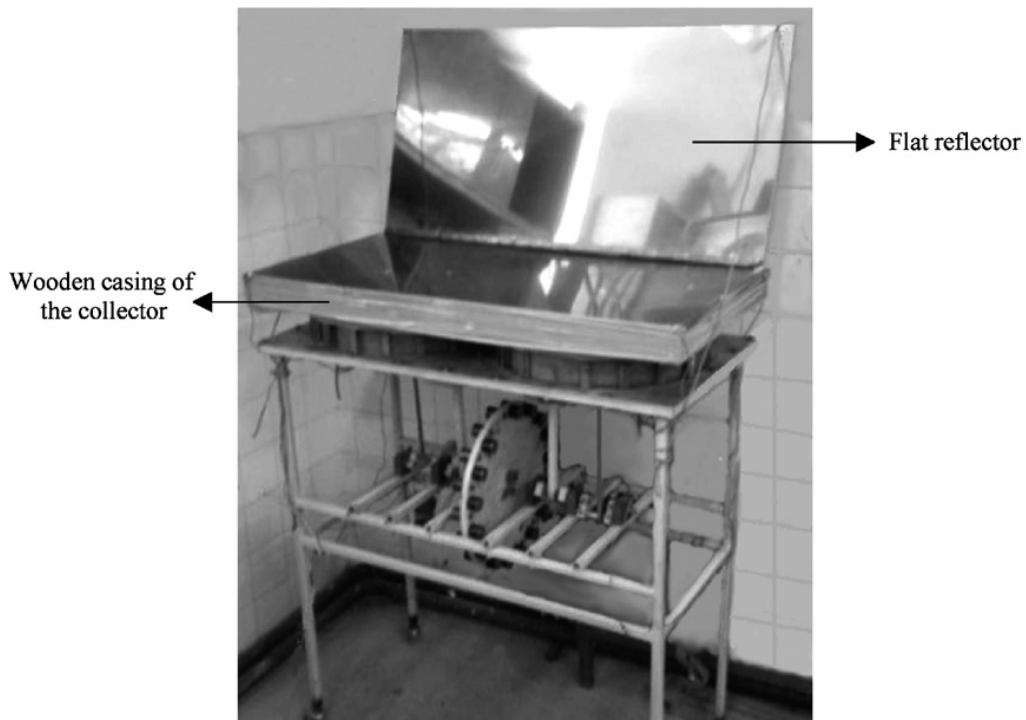


Figura (2.6) - Protótipo de motor Stirling tipo Gama desenvolvido por Tavakolpour (2008).

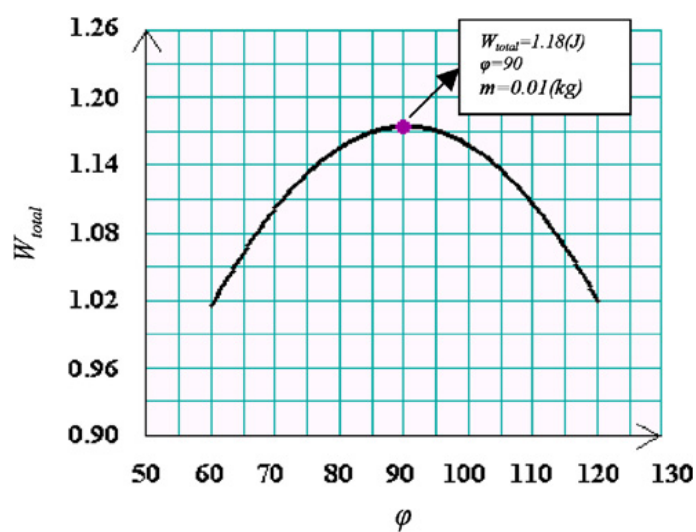


Figura (2.7) – Trabalho total por ciclo em função do angulo de fase (TAVAKOLPOUR, 2008)

Shendage et al. (2010) relacionaram vários aspectos que precisam ser considerados na tomada de decisão nas diferentes etapas do projeto e desenvolvimento de um motor Stirling. Eles propuseram uma metodologia de projeto capaz de gerar e analisar uma série de alternativas de projetos possíveis que podem acelerar o processo de decisão no desenvolvimento de um motor Stirling tipo beta, inclusive na otimização do ângulo de fase. O trabalho visa encontrar uma solução viável para o projeto de um motor Stirling com um único cilindro com capacidade de 1,5 kWe para eletrificação rural.

Tarawneh et al. (2010) desenvolveram um modelo matemático com a finalidade de investigar os parâmetros que influenciam no desempenho do motor Stirling. Análise é realizada principalmente no interior dos cilindros de compressão e expansão. A variação da temperatura e da pressão do fluido de trabalho no interior dos cilindros é mostrada nas figuras (2.8) e (2.9).

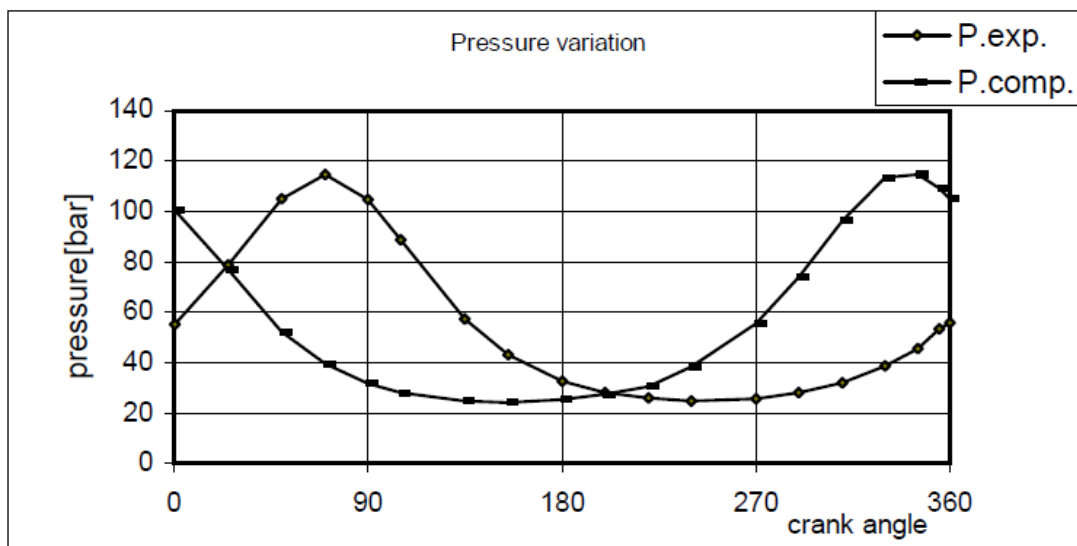


Figura (2.8) - Variação da pressão no interior dos cilindros (TARAWNEH, 2010)

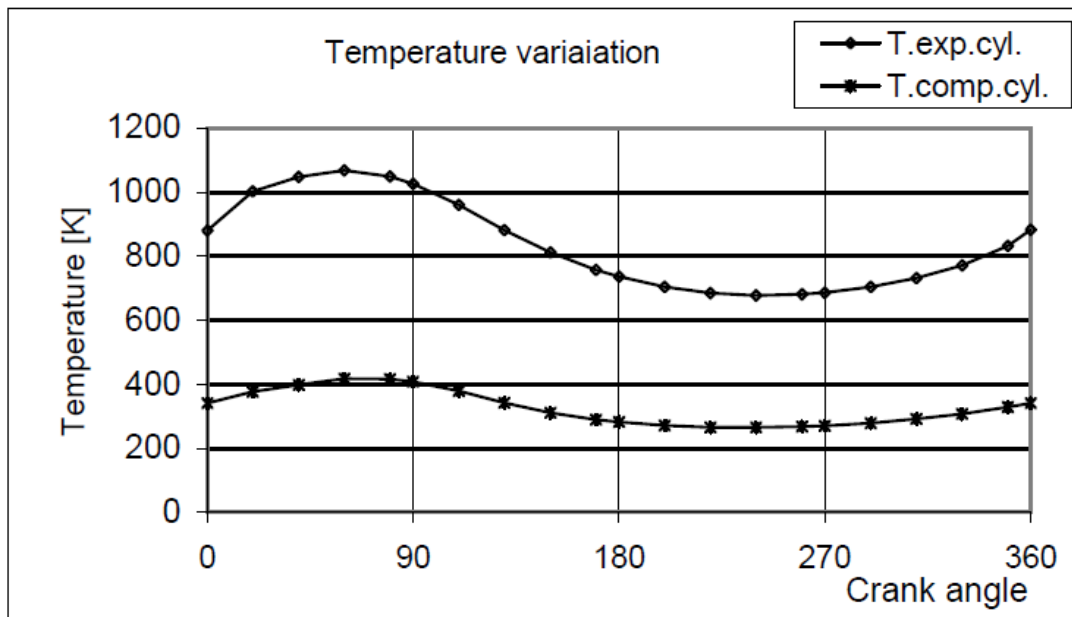


Figura (2.9) - Variação da temperatura no interior dos cilindros (TARAWNEH, 2010)

Ataer et al. (2005) realizaram um estudo termodinâmico de um motor Stirling tipo alfa formado por espaço de compressão, espaço de expansão, aquecedor, refrigerador e regenerador, para a realização do estudo o motor foi dividido em 14 volumes de controle fixos, figura (2.10). Eles desenvolveram um programa computacional em Fortran e consideraram as temperaturas das superfícies do aquecedor e do resfriador constante. Os testes foram realizados para pressões diferentes e essa relação entre a pressão e o COP é apresentada na figura (2.11).

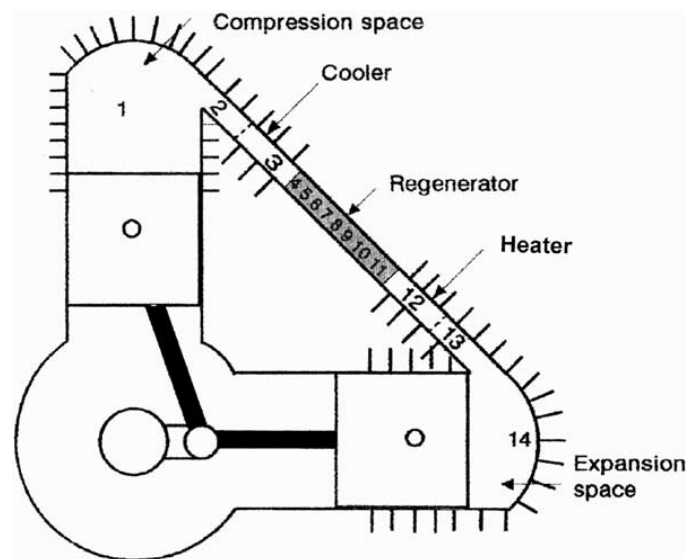


Figura (2.10) - Esquema do motor Stirling dividido em 14 volumes de controle, (ATAER, 2005)

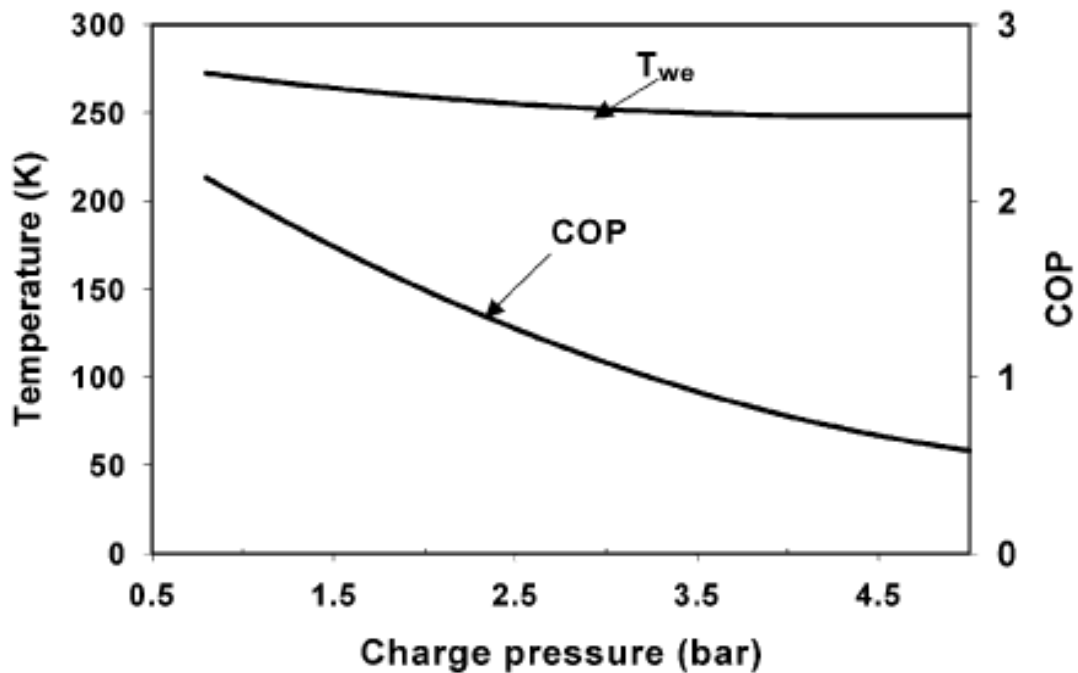
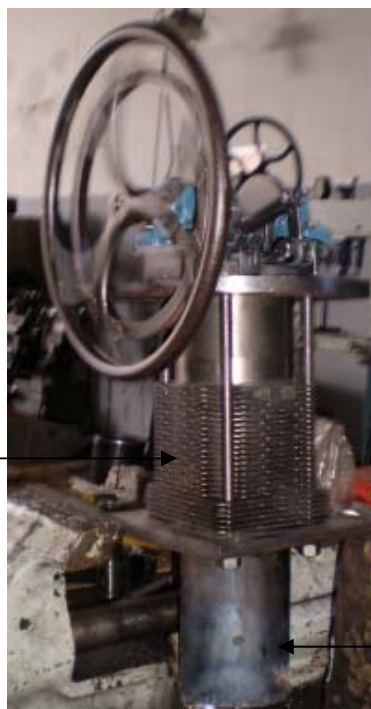


Figura (2.11) - Variação do COP e da temperatura da parede do espaço de expansão com a pressão (ATAER, 2005)

Manrique et al. (2009) construíram, testaram e apresentaram resultados experimentais e teóricos preliminares de um protótipo de motor Stirling tipo Beta para geração de energia elétrica. O protótipo construído obteve uma potência de saída de 30 W, girando a 180 rpm e temperatura da fonte quente de 400 °C obtido através da queima de biomassa realizada numa fornalha de material refratário. Foi utilizado ar como fluido de trabalho, e o volume varrido pelo deslocador foi de 392 cm³. Os testes também foram realizados através da queima de gás natural, ilustrados na figura (2.13). A figura (2.12) mostra o protótipo desenvolvido por Manrique et al. (2009) e o quadro (2.2) apresenta as características do mesmo.

Trocador Frio



Trocador Quente

Figura (2.12) - Protótipo do motor Stirling desenvolvido por Manrique et al. (2009)



Figura (2.13) – Fornalha (direita) e chama (esquerda) utilizadas nos testes com biomassa e com gás, respectivamente (MANRIQUE et al., 2009)

Quadro (2.2)- Especificações do motor Stirling desenvolvido por Manrique et al. (2009)

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

Cinar et al. (2005) fabricaram e testaram um motor Stirling tipo beta com 192 cm³ de volume deslocado, funcionando a pressão atmosférica, figura (2.14). O protótipo foi testado utilizando um aquecedor elétrico à 800, 900 e 1000 °C de temperatura. O torque a variação de potência foi obtida para diferentes velocidades de rotação. A potência máxima encontrada foi 5,98 W à 208 rpm e temperatura de 1000 °C. As figuras (2.15), (2.16) e (2.17) apresentam a variação do torque e da potência em função da velocidade de rotação, à 800, 900 e 1000 °C.



Figura (2.14) Motor Stirling tipo beta desenvolvido por Cinar et al. (2005)

Quadro (2.3) - Especificações do motor Stirling desenvolvido por Cinar et al. (2005)

Configuração do motor	Beta
Diâmetro x Curso (mm)	70 x 50
Volume deslocado (cc)	192
Anglo de fase	90°
Taxa de compressão	1,65:1
Fluido de trabalho	Ar
Refrigeração	Fluxo de água
Potência máxima	5,98 W a 208 rpm

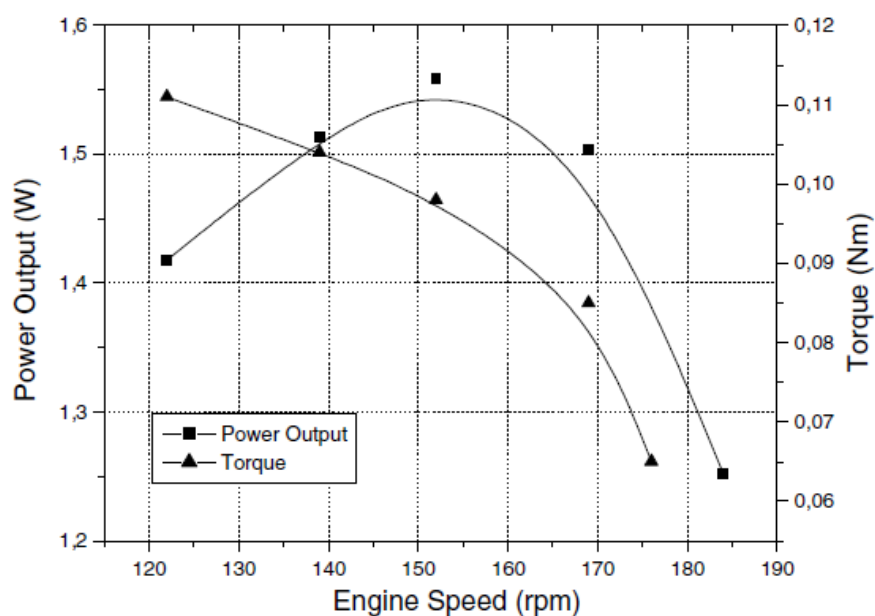


Figura (2.15) – Torque e potência x velocidade à 800° C (CINAR et al., 2005)

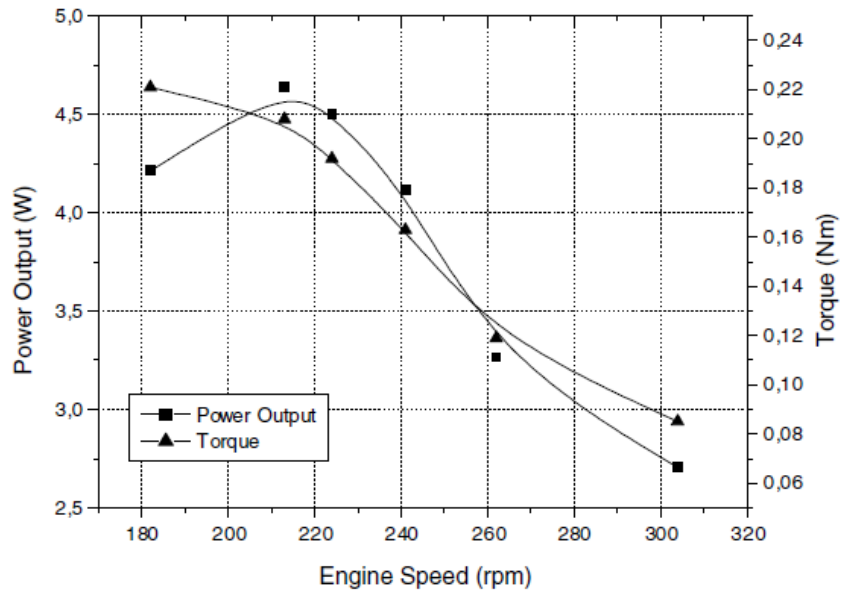


Figura (2.16) - Torque e potência em função da velocidade à 900° C (CINAR et al., 2005)

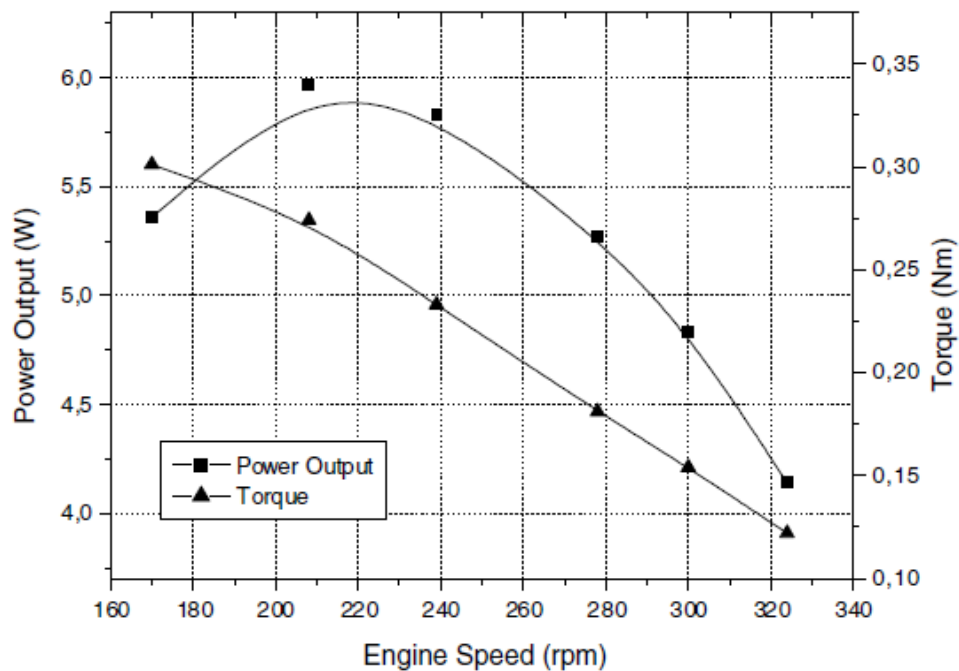


Figura (2.17) – Torque e potência x velocidade à 1000 °C (CINAR et al., 2005)

2.1 O MOTOR STIRLING

A tecnologia dos motores Stirling é antiga e foi desenvolvida pelo escocês Robert Stirling em 1816, antes dos motores de combustão interna. Desde então, vários

motores com base em sua invenção foram construídos em muitas formas e tamanhos (ÇINAR, 2004).

Existem vários métodos para converter energia solar em energia mecânica, um desses métodos teoricamente associado com máxima eficiência é o motor Stirling ou motor de ar quente, pois necessita apenas de uma fonte de calor externa. Esses motores oferecem alta eficiência com baixa emissão de poluentes em comparação com os motores de combustão interna. Motores de ar quente são limpos, eficientes e funcionam silenciosamente com qualquer tipo de combustível (TAVAKOLPOUR, ZOMORODIAN e GOLNESHAN, 2008).

Em 1970 e 1980 várias pesquisas foram realizadas sobre utilização de motores Stirling em automóveis por empresas como General Motors e Ford. A principal desvantagem é a tendência que o motor Stirling tem de trabalhar com potência constante e isto não é ideal para automóveis. Mas esta característica é perfeita para aplicações tais como bombeamento de água. Estudos sobre os motores de alta temperatura foram amplamente relatados. Na maioria dos modelos, os motores operam com temperaturas de aquecimento e resfriamento em torno de 923 K e 338 K respectivamente. O limite térmico de operação dos motores de alta temperatura depende do material usado na sua construção. A eficiência desses motores é entre 30 e 40 % numa faixa de temperatura típica de 923-1073 K e velocidade de operação entre 2000 a 4000 rpm. (KONGTRAGOOL e WONGWISES, apud TAVAKOLPOUR, 2008).

O motor Stirling realiza dois processos isotérmicos e possui um mecanismo de recuperação de calor entre dois processos isocóricos, isto torna a eficiência deste ciclo maior que a de outros ciclos de motores convencionais. Assim, para uma conversão eficiente de energia térmica em potência mecânica é muito importante que os trocadores de calor quente e frio, bem como o regenerador trabalhem adequadamente. Com o regenerador trabalhando sem muitas perdas a quantidade de calor requerida pelo motor a cada ciclo se torna menor. Por isso, o desenvolvimento dos trocadores de calor e do regenerador adequados para cada tipo de motor é indispensável. (KAGAWA et al., 2007 apud PAULA, 2007)

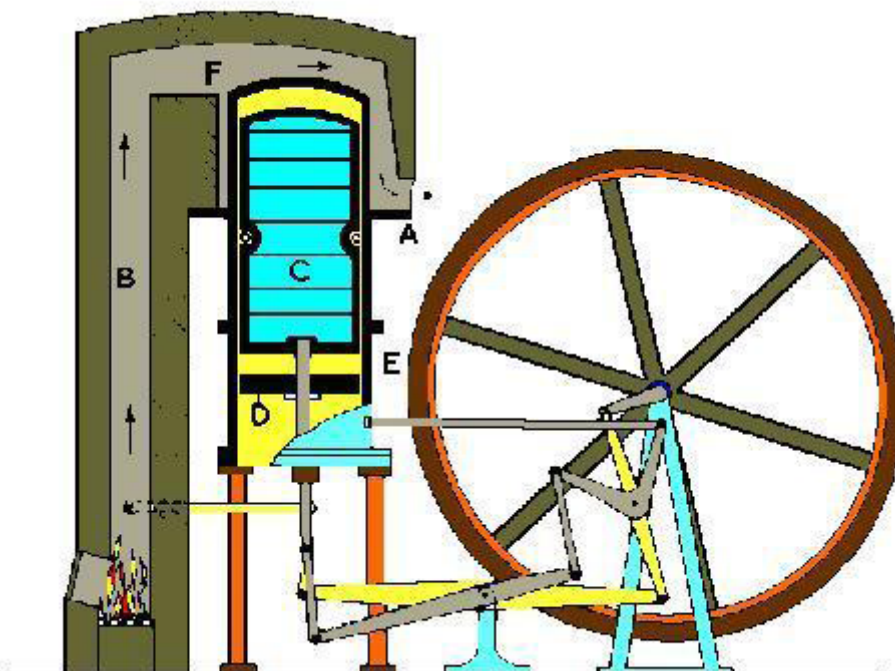


Figura (2.18) - Motor Original de Robert Stirling

A figura (2.18) apresenta o desenho esquemático do motor original de Robert Stirling, neste motor, calor é gerado na fornalha através da queima de um combustível fazendo com que os gases da combustão passem pelos pontos B e F e saiam pela tubulação de escape localizada no ponto A. O pistão de deslocamento C tem a função de deslocar o ar quente do espaço de expansão, localizado no ponto F, para o espaço de compressão, no ponto E. O pistão D é o responsável efetivamente pela geração de potência. Com o deslocamento do fluido de trabalho da parte quente do motor para a parte fria, através do pistão de deslocamento, esquentando e resfriando continuamente o fluido e com um mecanismo para sincronizar o movimento dos pistões, acontece o funcionamento do motor.

John Ericsson, engenheiro e inventor sueco, foi responsável pelo auge da produção de motores Stirling. Ele obteve sucesso fabricando um motor Stirling prático, sendo vendidas umas 2000 unidades, numa faixa entre 0,5 a 5 hp, por volta de 1850 na Inglaterra e nos Estados Unidos. Depois disso, vários motores Stirling foram feitos com maiores potências e eficiências. Entretanto, a capacidade dos motores Stirling produzidos neste período era inferior comparado aos motores Otto e Diesel (HIRATA, 1995 apud BARROS, 2005).

Por necessitarem uma tolerância menor do que a requerida pelos motores de combustão interna no processo de fabricação, os motores Stirling demandavam atenção especial, isto aumentava o seu custo de fabricação. Os motores de combustão interna além de terem menor custo de fabricação, geram potências mais elevadas, o que contribuiu para desaparecimento comercial do motor Stirling. Os motores Stirling ocuparam, por muitos anos, um papel pouco relevante entre os tipos de motores, pois quando comparados com outras máquinas, perdiam na relação entre o custo de fabricação e potência produzida. Nos anos 1930, pesquisadores da Philips Company, na Holanda, reconheceram várias possibilidades neste antigo motor, e utilizaram modernas técnicas de engenharia para a sua fabricação. Desde então, a Philips Company investiu milhões de dólares, criando uma posição de destaque para a tecnologia de motores Stirling. Os desenvolvimentos realizados geraram motores com bom funcionamento, silenciosos, com elevada eficiência e com a possibilidade de usar qualquer fonte de calor. Suas principais aplicações podem ser a propulsão veicular, geração de eletricidade, geração direta de potência hidráulica, e como bomba de calor. São geralmente chamados de motor a ar e são caracterizados pela confiabilidade e segurança, porém baixa potência específica (MARTINI, 1983).

Motores Stirling de várias configurações foram desenvolvidos ao longo dos anos e metodologias diferentes também foram usadas para fins de análise e comparação entre os mesmos. Shoureshi comparou os motores Stirling, Rankine e Brayton em diferentes condições e mostrou que os motores Stirling são mais eficientes do que os outros (SHENDAGE et al., 2010).

O aumento do conhecimento matemático para simular a operação dos motores Stirling juntamente com o aprimoramento tecnológico que possibilitou o desenvolvimento de novos materiais, tornou possível a fabricação de motores mais baratos e eficientes. Assim, a capacidade de usar diferentes combustíveis passou a gerar interesse em seu princípio novamente (BARROS, 2005).

2.1.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E CICLO TERMODINÂMICO

Um motor Stirling difere em muitos aspectos do motor de combustão interna, o fluido de trabalho (ar, hélio ou hidrogênio) contido no motor tem massa fixa, diferentemente dos outros tipos de motores. Através do aquecimento e resfriamento dos trocadores de calor quente e frio, respectivamente, ocorre a expansão e contração do gás

de trabalho que movimenta-se do lado frio para o lado quente devido ao movimento dos pistões para motores do tipo Alfa, e pelo movimento de um pistão de deslocamento para motores do tipo beta e gama.

Essa mudança na temperatura do gás de trabalho causa uma variação de pressão decorrente da expansão e contração do mesmo, este efeito gera a força que é entregue ao eixo através do movimento do pistão de potência. O princípio de funcionamento do motor Stirling é baseado em um ciclo fechado, onde o gás de trabalho é mantido dentro dos cilindros e o calor é adicionado e removido do espaço de trabalho através de trocadores de calor.

O ciclo ideal de Stirling consiste de dois processos isotérmicos e dois isocóricos como mostra a figura (2.19). O ciclo opera entre mínima e máxima temperaturas, T_c e T_h . O limite de T_h depende do material de construção do motor. O regenerador é formado por uma malha metálica localizada entre os trocadores de calor quente e frio com finalidade de receber e ceder calor ao fluido de trabalho aumentando a eficiência do ciclo.

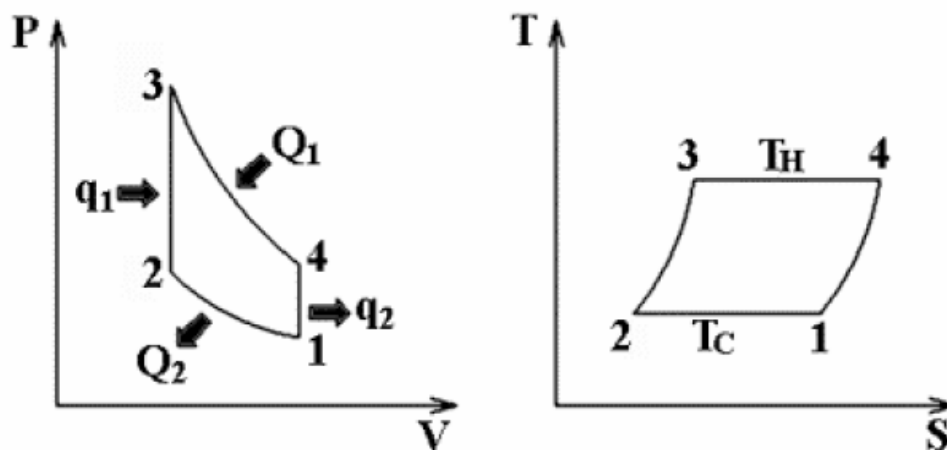


Figura (2.19) – Diagrama $P \times V$ e $T \times S$ do ciclo ideal de Stirling

- 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.

Teoricamente, para as mesmas temperaturas, o ciclo de Stirling em condições ideais possui o mesmo grau de eficiência que o ciclo de Carnot, ou seja:

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

O rendimento real do motor é dado pela equação abaixo:

$$\eta_{real} = \frac{P_{Mec}}{P_T}$$

Onde:

η_{real} = Rendimento real

P_{Mec} = Potência mecânica

P_T = Potência térmica

Aquecimento Isocórico (fase 2 – 3):

Ocorre o aquecimento do gás a volume constante, aumentando assim a temperatura de TC para TH. O êmbolo deslocador transfere o gás que se encontra no pólo frio para o pólo quente. Sendo o gás aquecido pela fonte de calor, a pressão deste aumenta, sem que haja, no entanto, variação no volume durante o aumento de pressão, ou seja:

$$W = 0 \qquad q_1 = n \cdot C_V \cdot (T_H - T_C)$$

Expansão Isotérmica (fase 3 – 4):

Ocorre uma expansão a temperatura constante TH, aumentando assim o volume de Vm para VM, durante a qual o gás realiza trabalho. Devido à pressão acrescida no gás, este vai empurrar o pistão realizando assim, trabalho para o exterior enquanto absorve calor da fonte quente, ou seja:

$$dU = 0 \qquad Q_1 = n \cdot R \cdot T_H \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right)$$

Arrefecimento Isocórico (fase 4 – 1):

Ocorre o arrefecimento do gás a volume constante, aumentando assim a temperatura de TH para TC. O êmbolo deslocador transfere agora o gás que se encontra no pólo quente para o pólo frio. Visto que o gás é agora arrefecido pelo sistema de arrefecimento, a pressão diminui sem que se verifique, no entanto, variação no volume durante a diminuição da pressão, ou seja:

$$W = 0$$

$$q_2 = n \cdot C_V \cdot (T_C - T_H)$$

Compressão Isotérmica, (fase 1 – 2):

Ocorre a compressão a temperatura constante T_C , diminuindo assim o volume de V_M para V_m , durante a qual o exterior realiza trabalho sob o gás. Estando o gás agora, a uma pressão inferior, o pistão vai ser empurrado pelo ar exterior sofrendo por isso trabalho, enquanto dissipa calor para exterior, ou seja:

$$dU = 0 \qquad Q_2 = n \cdot R \cdot T_C \cdot \ln\left(\frac{V_m}{V_M}\right)$$

2.1.2 CLASSIFICAÇÃO CONFORME DISPOSIÇÃO DOS PISTÕES

O motor Stirling é um motor de pistão que funciona com fonte de calor externa. Há diversos tipos como alfa, beta, gama. O tipo alfa mostrado na Figura (2.18) usa dois cilindros num sistema fechado. O cilindro quente recebe o calor e o cilindro frio é refrigerado por um trocador de calor. Os dois pistões são conectados ao eixo do motor. No passo (1) $\rightarrow$ (2) ocorre o aquecimento e expansão do gás de trabalho no cilindro quente expande e empurrando o pistão de potência; no passo (2) $\rightarrow$ (3) o gás de trabalho contido no cilindro quente é transferido para o cilindro de compressão armazenando calor no regenerador; no passo (3) $\rightarrow$ (4) o gás frio é comprimido à temperatura constante e no passo (4) $\rightarrow$ (1) ocorre o deslocamento do gás de trabalho para o cilindro de expansão e transferência do calor armazenado no regenerador para o fluido de trabalho.

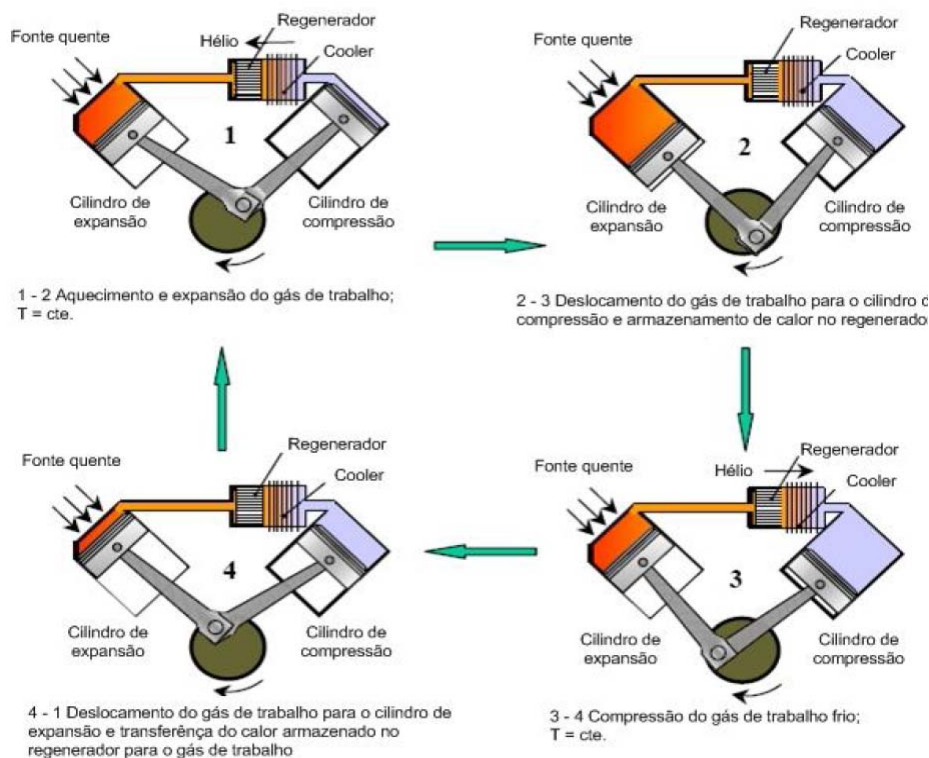


Figura (2.20) Esquema básico do motor Stirling tipo Alfa (PAULA, 2007)

No motor Stirling tipo beta, os pistões de deslocamento e de potência são montados no mesmo cilindro, como mostra a figura (2.19).

No passo (a) $\rightarrow$ (b) o pistão deslocador transfere o fluido de trabalho do espaço frio para o espaço quente promovendo o aquecimento do mesmo e consequente aumento de pressão realizando trabalho. No passo (c) $\rightarrow$ (d) o fluido é transferido pelo deslocador para o espaço frio onde ocorre a compressão do gás, no passo (e) $\rightarrow$ (b) o deslocador transfere novamente o fluido para o espaço de expansão recomeçando o ciclo.

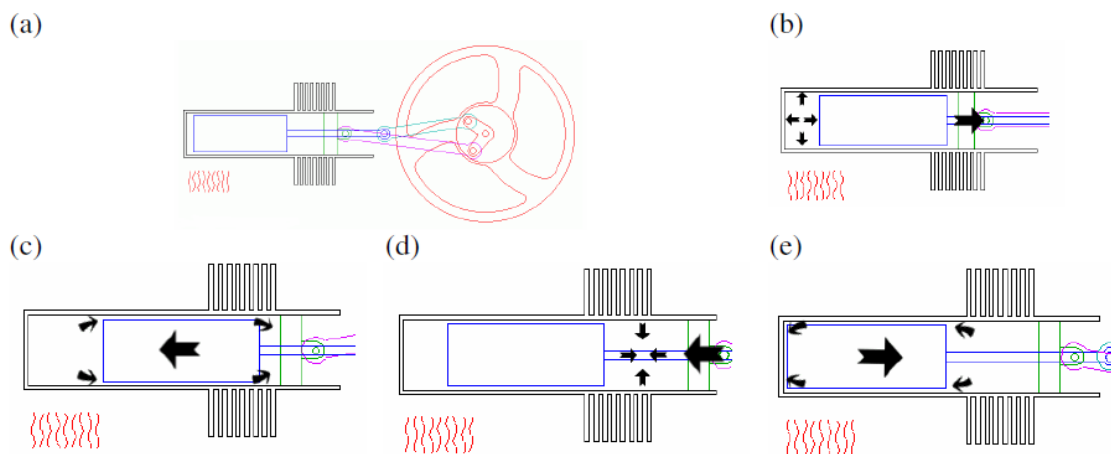


Figura (2.21) - Esquema básico de funcionamento do motor Stirling tipo Beta

O tipo gama é similar ao tipo beta, porém com os pistões montados em cilindros diferentes. Um exemplo está mostrado na Figura (2.20).

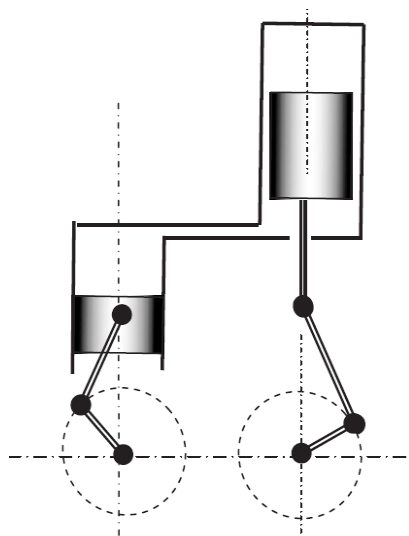


Figura (2.22) - Esquema básico do motor Stirling tipo Gama

2.2 TEOREMA DE SCHMIDT PARA MOTORES STIRLING

A primeira análise de um motor Stirling foi publicada por Schmidt em 1871, ou seja, 55 anos depois de sua invenção e tornou-se a análise clássica para os motores Stirling. A análise realizada por Schmidt contempla os motores de configuração alfa, beta e gama e fornece a variação sinusoidal do volume do espaço de trabalho, a teoria mantém as considerações de compressão e expansão isotérmica e regeneração perfeita sendo, portanto, altamente idealizada, mas é certamente mais realista do que o ciclo de Stirling ideal. A análise matemática detalhada é complicada apesar da aparente simplicidade conceitual do motor. Na fase de projeto a teoria de Schmidt pode ser uma ferramenta muito útil. (THOMBAREA e VERMAB, 2008)

A teoria de Schmidt é um dos métodos de cálculo isotérmico para motores Stirling. É o método mais simples e muito usado durante o desenvolvimento do motor. Esta teoria é baseada na expansão e compressão isotérmica de um gás ideal. (HIRATA, 1997).

Paula (2007) utilizou o teorema de Schmidt para a definição prévia das dimensões e características de desempenho necessárias para se iniciar o projeto de desenvolvimento e construção de um motor Stirling.

Barros (2005) fez uso do teorema de Schmidt para avaliar teoricamente o motor Stirling modelo Solo 161 e apresentou a comparação entre os resultados dos testes e os obtidos com o modelo de Schmidt.

Tavakolpour et al. (2008) utilizaram o teorema de Schmidt para modelar um motor Stirling tipo gama com baixa diferença de temperatura alimentado por energia solar. Programas computacionais foram desenvolvidos utilizando o teorema para avaliar o modelo e otimizar os parâmetros de projeto do motor.

O teorema de Schmidt é muito útil para a determinação de uma razoável aproximação para o desempenho do motor. Entretanto, algumas suposições e simplificações são feitas, por se tratar de uma análise teórica. Na prática, o desempenho do motor é geralmente menor que 60 % do desempenho obtido na teoria de Schmidt (ROGDAKIS, 2002 apud PAULA, 2007).

O desempenho do motor pode ser calculado utilizando um diagrama P-V. O volume do motor é fácil de calcular utilizando as geometrias internas. Quando o volume, a massa do gás de trabalho e a temperatura são escolhidos, a pressão é calculada pela equação do gás perfeito, equação 2.1.

$$P.V = m.R.T \quad (2.1)$$

Quadro (2.4) Considerações usadas na teoria de Schmidt

a	Não há perda de calor nas trocas de calor, e não há diferenças internas de pressão
b	Os processos de expansão e compressão são isotérmicos
c	O gás de trabalho é considerado como gás ideal
d	A regeneração ocorre de forma perfeita, ou seja, não há perdas no regenerador
e	O volume morto de expansão mantém a temperatura do gás na expansão - T_E , e o volume morto de compressão mantém a temperatura do gás na compressão - T_C durante o ciclo.
f	A temperatura do gás no regenerador é uma média da temperatura do gás na expansão - T_E e a temperatura do gás na compressão - T_C
g	O volume de expansão - V_E e o volume de compressão - V_C variam conforme uma Senoide

Quadro (2.5) Parâmetros utilizados na teoria de Schmidt

Nome	Símbolo	Unidade
Pressão do motor	P	MPa
Volume percorrido pelo pistão de expansão ou de deslocamento (swept volume of expansion)	V_{SE}	m^3
Volume percorrido pelo pistão de compressão ou de potência (swept volume of compression)	V_{sc}	m^3
Volume morto do espaço de expansão	V_{DE}	m^3
Volume do regenerador	V_R	m^3
Volume morto do espaço de compressão	V_{DC}	m^3
Volume momentâneo do espaço de expansão	V_E	m^3
Volume momentâneo do espaço de compressão	V_C	m^3
Volume total momentâneo	V	m^3
Massa total do gás de trabalho	M	kg
Constante de gás	R	J/kgK
Temperatura do gás no espaço de expansão	T_E	K
Temperatura do gás no espaço de compressão	T_C	K
Temperatura do gás no Regenerador	T_R	K
Ângulo de fase	$\Delta\alpha$	°
Temperatura relativa	$t = \frac{T_C}{T_E}$	-
Volume percorrido relativo	$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}}$	-
Volume morto relativo	$X = V_D/V_{SE}$	-
Rotação do motor	N	Hz
Energia indicada de expansão	E_E	J
Energia indicada de compressão	E_C	J
Energia indicada	E_i	J
Potência indicada de expansão	P_E	W
Potência indicada de compressão	P_C	W
Potência indicada	P_i	W
Eficiência indicada	H	-

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} [1 - \cos(x - dx)] + V_{DC} \quad (2-3)$$

O volume total instantâneo é calculado pela equação:

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (2-4)$$

Pelas suposições (a), (b) e (c), a massa total no motor - m é calculada usando a pressão do motor - P, cada temperatura - T, cada volume - V e a constante do gás - R.

$$m = \frac{PV_E}{RT_E} + \frac{PV_R}{RT_R} + \frac{PV_C}{RT_C} \quad (2-5)$$

A Temperatura relativa - t, o volume percorrido relativo - v e os volumes mortos relativos são encontradas usando as seguintes equações:

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (2-6)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (2-7)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (2-8)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (2-9)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (2-10)$$

A temperatura do regenerador - Tr é calculada pela equação (2-11), pelo uso da suposição (f) do quadro (2.4).

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad (2-11)$$

Quando a equação (2-5) é modificada, usando as equações (2-6) e (2-11), a massa total de gases - m é descrita pela equação (2-12).

$$m = \frac{P}{R\alpha T_c} \left(t\alpha V_E + \frac{2\alpha t\alpha V_R}{1+t} + V_c \right) \quad (2-12)$$

A equação (2-12) é transformada na equação (2-14), usando as equações (2-2) e (2-4).

$$m = \frac{PV_{SE}}{2RT_c} [S - B \cos(\alpha - a)] \quad (2-13)$$

Onde,

$$a = tg^{-1} \frac{v \cdot \sin \alpha}{t + \cos \alpha} \quad (2-14)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad (2-15)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \cos \alpha + v^2} \quad (2-16)$$

A pressão do motor - P é definida pela equação (2-17) usando a equação (2-14).

$$P = \frac{2mRT_c}{V_{SE} [S - B \cos(\alpha - a)]} \quad (2-17)$$

A pressão média - P_{mean} pode ser calculada como se segue:

$$P_{med} = \frac{1}{2\pi} \oint P d\alpha = \frac{2mRT_c}{V_{SE} \sqrt{S^2 - B^2}} \quad (2-18)$$

Sendo c definido por:

$$c = \frac{B}{S} \quad (2-19)$$

Como resultado, a pressão do motor - P, baseada na pressão media do motor - P_{med} é calculada pela equação (2-20).

$$P = \frac{P_{med} \sqrt{S^2 - B^2}}{S - B \cos(x - a)} = \frac{P_{med} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (2-20)$$

Em outro caso, quando $\cos(x-a)=-1$, a pressão do motor - P torna-se a pressão mínima - P_{min} , a próxima equação é introduzida.

$$P_{min} = \frac{2mRT_C}{V_{SE}(S + B)} \quad (2-21)$$

Conseqüentemente, a pressão do motor - P, baseada na pressão mínima - P_{min} é descrita pela equação (2-22).

$$P = \frac{P_{min}(S + B)}{S - B \cos(x - a)} = \frac{P_{min}(1 + c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (2-22)$$

Similarmente, quando $\cos(x-a) = 1$, a pressão do motor - P torna-se a máxima pressão - P_{max} . A equação (2-24) é introduzida.

$$P = \frac{P_{max}(S - B)}{S - B \cos(x - a)} = \frac{P_{max}(1 - c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (2-23)$$

O diagrama P-V do motor Stirling tipo Alfa pode ser construído a partir das equações descritas.

2.2.2 APLICAÇÃO DO TEOREMA DE SCHMIDT PARA O MOTOR STIRLING TIPO BETA

O desenvolvimento para as equações do motor Stirling tipo Beta é feito de forma semelhante ao do tipo Alfa. A Figura (2.24) apresenta um esquema mostrando as principais variáveis de um modelo de cálculo para o motor Stirling tipo Beta.

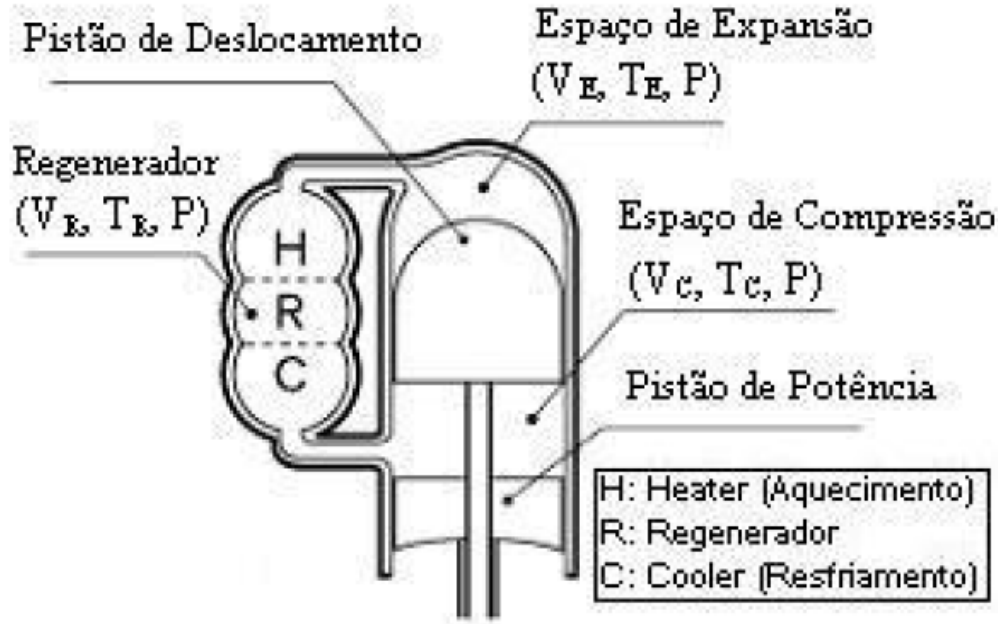


Figura (2.24) Esquema de um motor Stirling tipo Beta (HIRATA, 1995)

O volume instantâneo de expansão - V_E e o instantâneo de compressão - V_C estão descritos nas equações seguintes, com um volume percorrido pelo pistão de deslocamento - V_{SE} , volume percorrido pelo pistão de potência - V_{SC} e um ângulo de fase - dx entre o pistão de deslocamento e o pistão de potência.

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE} \quad (2-24)$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + \frac{V_{SC}}{2}[1 - \cos(x - dx)] + V_{DC} - V_B \quad (2-25)$$

No caso do motor Stirling tipo Beta, os pistões de deslocamento e de potência estão localizados no mesmo cilindro. Quando ambos os pistões sobrepõem seus cursos, um espaço de trabalho efetivo é criado. O volume sobreposto - V_B na equação (2.25) pode ser calculado pela equação (2.26).

$$V_B = \frac{V_{SE} + V_{SC}}{2} - \sqrt{\frac{V_{SE}^2 + V_{SC}^2}{4} - \frac{V_{SE}V_{SC}}{2}\cos dx} \quad (2-26)$$

Então, o volume total instantâneo - V é calculado pela equação (2.27).

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (2-27)$$

A pressão do motor - P baseada na pressão média - P_{med} na pressão mínima - P_{min} e na pressão máxima - P_{max} está descrita na seguinte equação, conforme a do motor Stirling tipo Alfa.

$$P = \frac{P_{med} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{min} (1 + c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{max} (1 - c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (2-28)$$

Diversas relações e coeficientes estão definidos a seguir.

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (2-29)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (2-30)$$

$$X_B = \frac{V_B}{V_{SE}} \quad (2-31)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (2-32)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (2-33)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (2-34)$$

$$a = \tan^{-1} \frac{v \cdot \sin dx}{t + \cos dx + 1} \quad (2-35)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1 + t} + v + 2X_{DC} + 1 - 2X_B \quad (2-36)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad (2-37)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (2-38)$$

O diagrama P-V para o motor Stirling tipo Beta pode ser construído a partir das equações descritas.

2.2.3 APLICAÇÃO DO TEOREMA DE SCHMIDT PARA O MOTOR STIRLING TIPO GAMA

A Figura (2.25) apresenta um esquema mostrando as principais variáveis de um modelo de cálculo para o motor Stirling tipo Gama.

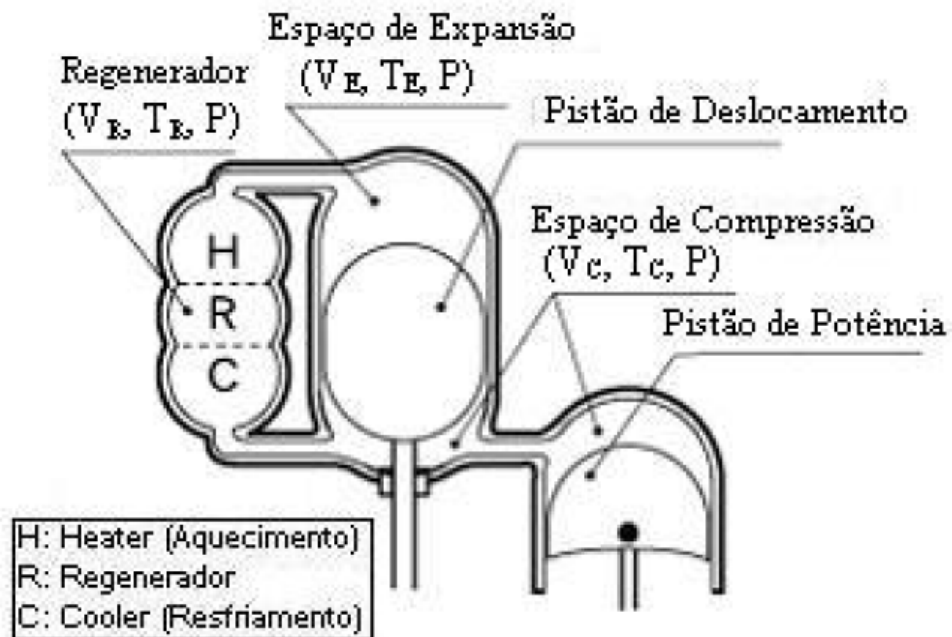


Figura (2.25) Esquema de um motor Stirling tipo Gama (Hirata, 1995)

O desenvolvimento das equações é feito de maneira similar ao dos motores tipo Alfa e Beta. O volume instantâneo de expansão - V_E e o volume instantâneo de compressão - V_C estão descritos nas equações a seguir com um volume percorrido pelo

pistão de deslocamento - V_{SE} , e pelo pistão de potência - V_{SC} e um ângulo de fase - dx entre o pistão de deslocamento e de potência.

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE} \quad (2-39)$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + \frac{V_{SC}}{2}[1 - \cos(x - dx)] + V_{DC} \quad (2-40)$$

O volume total instantâneo - V é descrito na próxima equação.

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (2-41)$$

A pressão do motor - P baseada na pressão média - P_{med} na pressão mínima - P_{min} e na pressão máxima - P_{max} está descrita na seguinte equação:

$$P = \frac{P_{med} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{min}(1 + c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{max}(1 - c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (2-42)$$

Agora,

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (2-43)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (2-44)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (2-45)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (2-46)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (2-47)$$

$$a = tg^{-1} \frac{v.sen dx}{t + \cos dx + 1} \quad (2-48)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1 \quad (2-49)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad (2-50)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (2-51)$$

O diagrama P-V para o motor Stirling tipo Gama pode ser construído a partir das equações descritas.

2.2.4 ENERGIA, POTÊNCIA INDICADA E EFICIÊNCIA

A energia indicada (área do diagrama P-V) para a expansão e para a compressão pode ser calculada como uma solução analítica fazendo uso dos coeficientes encontrados acima. A energia indicada na expansão – E_E (J), baseada na pressão média - P_{med} , na pressão mínima - P_{min} e na pressão máxima - P_{max} é descrita pela equação (2.52).

$$E_E = \oint PdV_E = \frac{P_{med}V_{SE}\pi c.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} = \frac{P_{min}V_{SE}\pi c.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+c}}{\sqrt{1-c}} = \frac{P_{max}V_{SE}\pi c.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1-c}}{\sqrt{1+c}} \quad (2-52)$$

A energia indicada de compressão – E_C (J) é descrita pela equação (2.53).

$$E_C = \oint PdV_C = -\frac{P_{med}V_{SE}\pi c.t.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} = -\frac{P_{min}V_{SE}\pi c.t.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+c}}{\sqrt{1-c}} = -\frac{P_{max}V_{SE}\pi c.t.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1-c}}{\sqrt{1+c}} \quad (2-53)$$

A energia indicada em um ciclo do motor – E_i (J) é apresentada na equação (2.54).

$$E_i = E_e + E_C = \frac{P_{med} V_{SE} \pi c (1-t) sena}{1 + \sqrt{1-c^2}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c (1-t) sena}{1 + \sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+c}}{\sqrt{1-c}} = \frac{P_{max} V_{SE} \pi c (1-t) sena}{1 + \sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1-c}}{\sqrt{1+c}} \quad (2.54)$$

Relações entre P_{med} , P_{min} e P_{max} são determinadas pelas próximas equações.

$$\frac{P_{min}}{P_{med}} = \sqrt{\frac{1-c}{1+c}} \quad (2.55)$$

$$\frac{P_{max}}{P_{med}} = \sqrt{\frac{1+c}{1-c}} \quad (2.56)$$

A potência indicada de expansão – W_E (W), a potência indicada de compressão – W_C (W) e a potência indicada do motor – W_i (W) estão definidas nas equações seguintes, utilizando a rotação do motor, n (rps, Hz).

$$W_E = E_E n \quad (2.57)$$

$$W_C = E_C n \quad (2.58)$$

$$W_i = E_i n \quad (2.59)$$

A energia indicada de expansão - E_E descrita pela equação (2.52) significa o calor de entrada através da fonte de calor para o motor. A energia indicada de compressão - E_C descrita pela equação (2.53) significa a rejeição de calor do motor para o fluido de resfriamento (água ou ar). Então, a eficiência térmica do motor – η_t é calculada na próxima equação.

$$\eta_t = \frac{E_i}{E_E} = 1 - t \quad (2.60)$$

Esta eficiência, igualmente a do ciclo de Carnot é a mais alta eficiência de um motor térmico.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Atualmente, várias pesquisas vêm sendo realizadas no sentido de desenvolver a tecnologia dos motores Stirling, são projetados motores de diversas configurações e tamanhos, alimentados por diferentes tipos de combustíveis.

Nesta seção será descrita a bancada de ensaios, bem como a metodologia utilizada na construção do motor Stirling do tipo gama de pequeno porte, os ensaios serão realizados primeiramente utilizando a queima de gás e em seguida serão utilizadas resistências elétricas como fonte calor e um fluxo de água como fonte fria.

O protótipo desenvolvido tem como propósito principal mostrar a viabilidade deste tipo de motor incentivando o desenvolvimento de outras unidades de maior potência e que possam ser úteis nas diversas aplicações que requerem a utilização de motores, por exemplo, na geração de energia elétrica.

3.1 ESCOLHA DO MATERIAL E DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento deu-se a partir da seleção de um conjunto de peças padronizadas fabricadas para utilização em compressores de ar (pistão, biela, pino e cilindro) visando acelerar o processo de construção do motor. O pistão escolhido utiliza anéis de vedação de teflon e não requerem a utilização de óleo para funcionar com baixo nível de atrito, figura (3.1).

A partir das dimensões dos elementos padronizados foi possível o dimensionamento das demais peças do motor, introduzindo os parâmetros construtivos das mesmas no teorema de Schmidt. As dimensões das peças a serem confeccionadas foram estimadas obedecendo-se a proporção geralmente verificada em outros motores existentes, ou seja, o cilindro deslocador 40 % a 60 % maior que o cilindro de potência. Os valores estimados foram introduzidos no teorema observando-se a potência de saída desejada, aproximadamente 10 W. Pode ser visto na figura (3.2) uma simulação da potência de saída em função da temperatura da fonte quente obtida através do teorema de Schmidt.



Figura 3.1 - Conjunto de peças padronizadas utilizadas no protótipo

Os parâmetros de funcionamento: temperatura da fonte quente, temperatura da fonte fria e rotação, utilizados no teorema de Schmidt, foram estimados observando-se os valores geralmente aplicados em motores Stirling. O quadro (3.1) mostra os parâmetros construtivos e de funcionamento do motor obtidos através das equações de Schmidt.

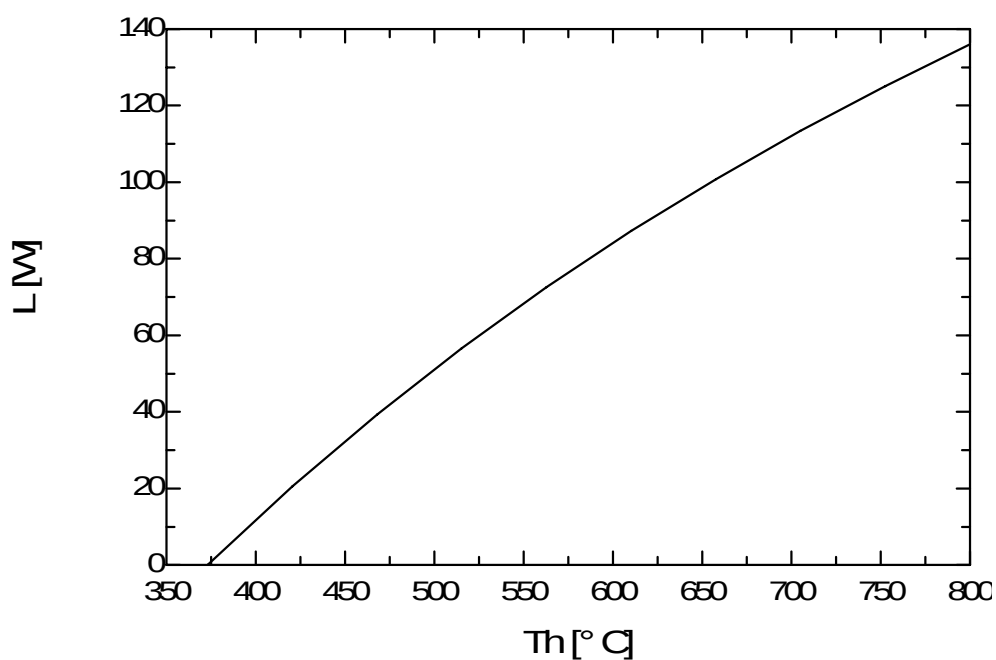


Figura (3.2) – Variação da potência em função da temperatura do trocador de calor de aquecimento obtida por Schmidt

Quadro (3.1) – Parâmetros construtivos e de funcionamento obtidos através do teorema de Schmidt

Diâmetro do Pistão de potência (cm)	4,8
Diâmetro do Pistão de deslocamento (cm)	5,8
Diâmetro do cilindro de deslocamento (cm)	6,0
Curso do Pistão de Potência (cm)	4,4
Curso do Pistão de deslocamento (cm)	4,4
Comprimento do Cilindro de potência (cm)	12
Comprimento do pistão de potência (cm)	6
Comprimento do Cilindro de deslocamento (cm)	20
Volume morto do espaço de expansão (cm ³)	24
Volume morto do espaço de compressão (cm ³)	35
Volume deslocado pelo pistão de deslocamento (cm ³)	124,4
Volume deslocado pelo pistão de potência (cm ³)	79,6
Volume do regenerador (cm ³)	0
Temperatura do espaço de expansão (°C)	400
Temperatura do espaço de compressão (°C)	60
Constante dos gases (R)	8,314
Ângulo de fase (°)	90

O cilindro do deslocador foi construído em aço inoxidável obedecendo às dimensões adquiridas no teorema de Schmidt, figura (3.3).



Figura (3.3) - Cilindro do deslocador com trocadores de calor

Os trocadores de calor quente e frio são localizados diretamente no cilindro do deslocador, o calor é fornecido em uma das extremidades e a outra é resfriada através do fluxo de água, figura (3.3). A vedação da câmara de água foi feita com selante para motores, produto utilizado para substituir junta de papel, de cortiça, silicone e borracha de juntas em todos os tipos de motores. Após sua vulcanização forma uma camada a prova de vazamentos, resistente a altas temperaturas, com pico até 235 °C.

O acoplamento entre o pistão deslocador e o virabrequim é feito através de um pino de aço retificado acoplado a um cilindro de aço com ajuste com folga pequena o necessário para impedir o vazamento do fluido de trabalho, isto é observado na figura (3.4).



Figura (3.4) - Acoplamento do virabrequim ao pistão deslocador

O deslocador é montado com folga de 1 mm em relação ao cilindro e é feito de aço, seu comprimento é 15 cm, figura (3.5).



Figura (3.5) - Pistão deslocador

O virabrequim é formado por dois discos de aço acoplados às bielas com defasagem de 90° , os discos de aço funcionam como volante e são montados em um suporte com rolamentos. A figura (3.6) mostra o protótipo completo.

É possível observar na figura (3.6) que nesta montagem não há acesso à ponta do eixo do motor devido à passagem da biela, isso impossibilita o acoplamento do freio de Prony utilizado para a medição do torque do motor. Para resolver esse problema, outra montagem foi realizada, posicionando as bielas dos dois pistões no mesmo pino, tornando livre a extremidade do eixo do motor. A figura (3.7) mostra o desenho esquemático do protótipo, a montagem pode ser observada na figura (3.8).

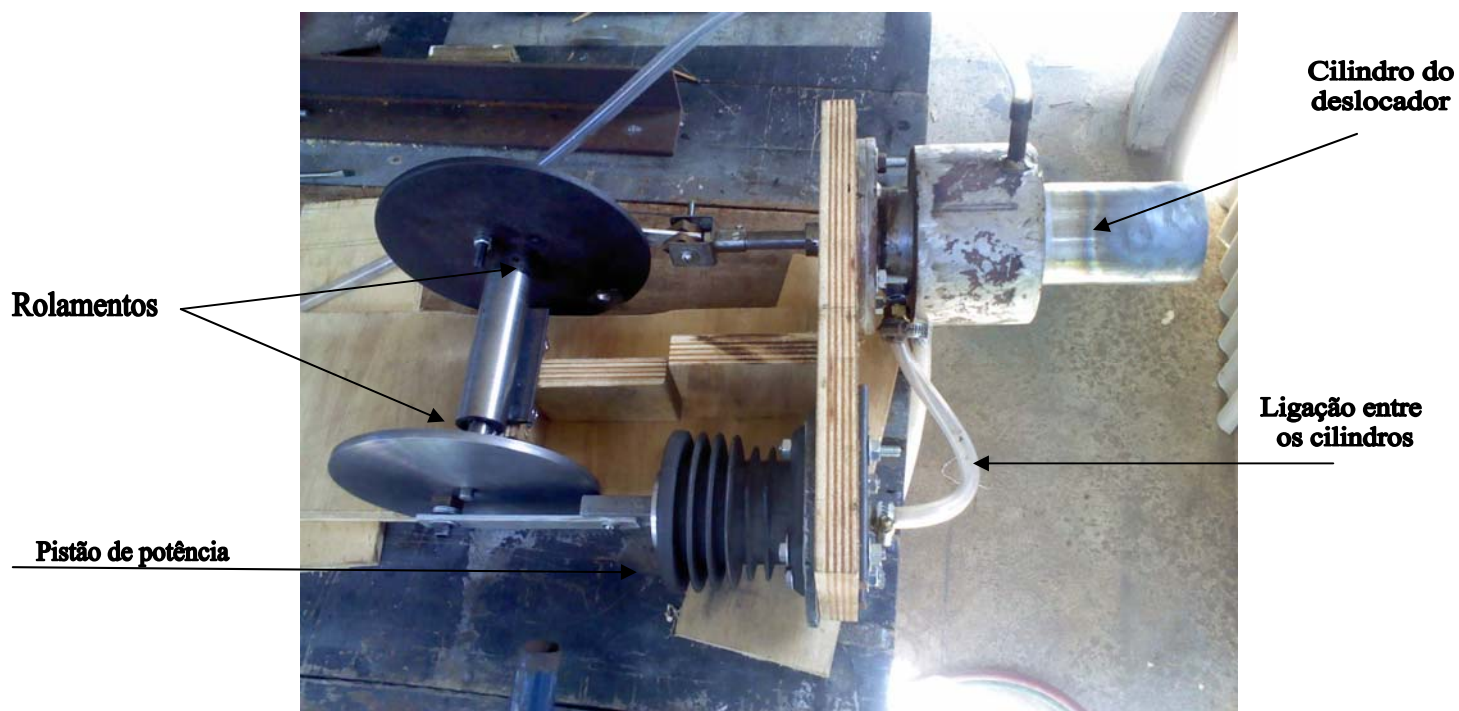


Figura (3.6) - Protótipo do Motor Stirling completo

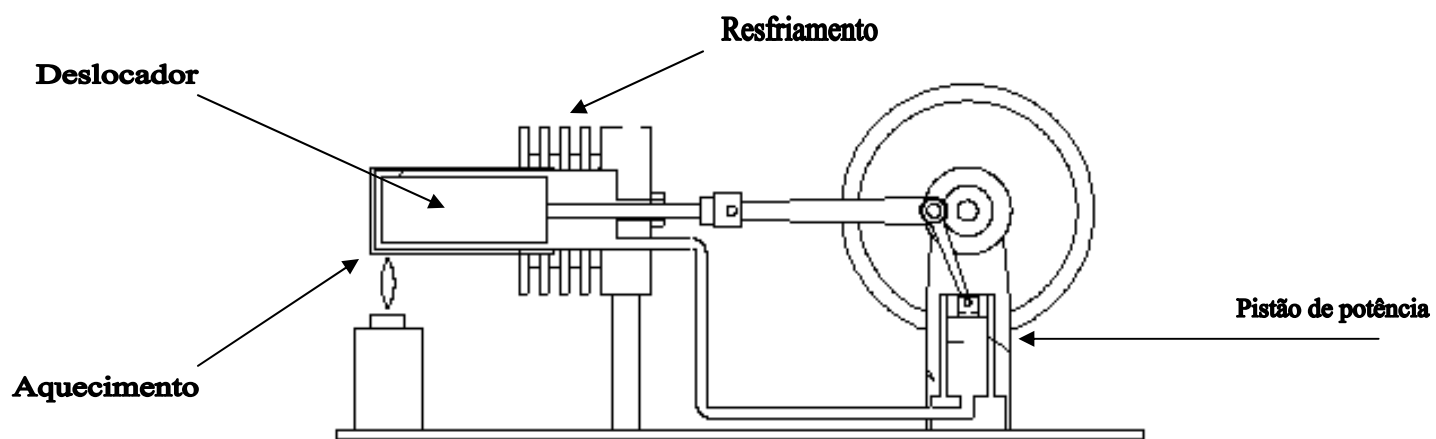


Figura (3.7) – Desenho esquemático da nova montagem do motor



Figura (3.8) Montagem do motor Stirling com os dois pistões acoplados ao mesmo pino

3.2 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de ensaios é formada pelo protótipo do motor Stirling tipo gama desenvolvido no laboratório, instalado para operar através do aquecimento promovido por resistências elétricas, um fluxo de água à temperatura ambiente, um gerador elétrico acoplado ao eixo do motor e os instrumentos de medição das grandezas a serem medidas.

Os ensaios foram feitos primeiramente com uma resistência elétrica e em seguida com duas. As resistências têm potência de 250 W cada uma e podem ser vistas na figura (3.9), seu posicionamento no trocador de calor foi feito como mostrado na figura (3.10).

Para medição de temperatura dos trocadores de calor quente e frio foram utilizados termopares tipo K e um voltímetro digital para medição da tensão. A tensão medida em [mV] é convertida em [$^{\circ}\text{C}$] através da tabela adequada para o termopar utilizado. O termopar foi posicionado na face esquerda do trocador de calor conforme apresentado na figura (3.8). Um tacômetro ótico foi usado para obter a rotação do motor.



Figura (3.9) - Resistências elétricas utilizadas como fonte de calor



Figura (3.10) - Posicionamento da resistência elétrica no trocador de calor

Na determinação do torque do motor foi utilizada o método Freio de Prony que consiste uma haste conectada ao eixo do motor, a haste é dotada de um mecanismo que permite aplicar pressão sobre o eixo e restringir o movimento do mesmo, transmitindo o esforço do motor para a haste que tem a extremidade apoiada em uma balança, a partir das leituras da balança, calcula-se o esforço despendido pelo motor, figura (3.11).

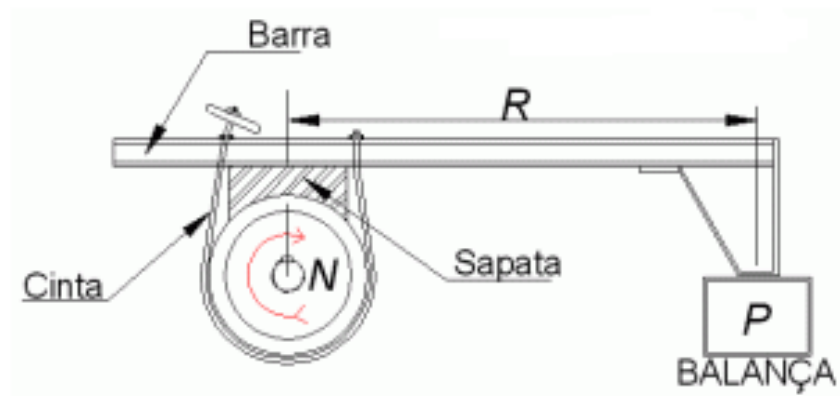


Figura (3.11) - Desenho esquemático do Freio de Prony

A figura (3.12) apresenta a instalação utilizada para o ensaio do motor. O trocador de calor de aquecimento foi isolado com um isolante a base de lã de rocha.



Figura (3.12) Vista geral da bancada de testes do motor Stirling

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O protótipo do motor Stirling foi ensaiado no Laboratório de Energia Solar (LES) da Universidade Federal da Paraíba. Na fase inicial de testes com o motor, foi utilizada a queima de gás liquefeito de petróleo (GLP), em seguida o fornecimento de calor deu-se através de uma resistência elétrica de 250 W e, por fim, adicionada uma segunda resistência, totalizando 500 W.

4.1 RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO UMA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE 250 W

Os primeiros testes relacionam o tempo com a temperatura da fonte quente, mantendo-se o trocador de calor de resfriamento a 30° C e uma vazão de água em 2,5 litros/minuto. Figura (4.1).

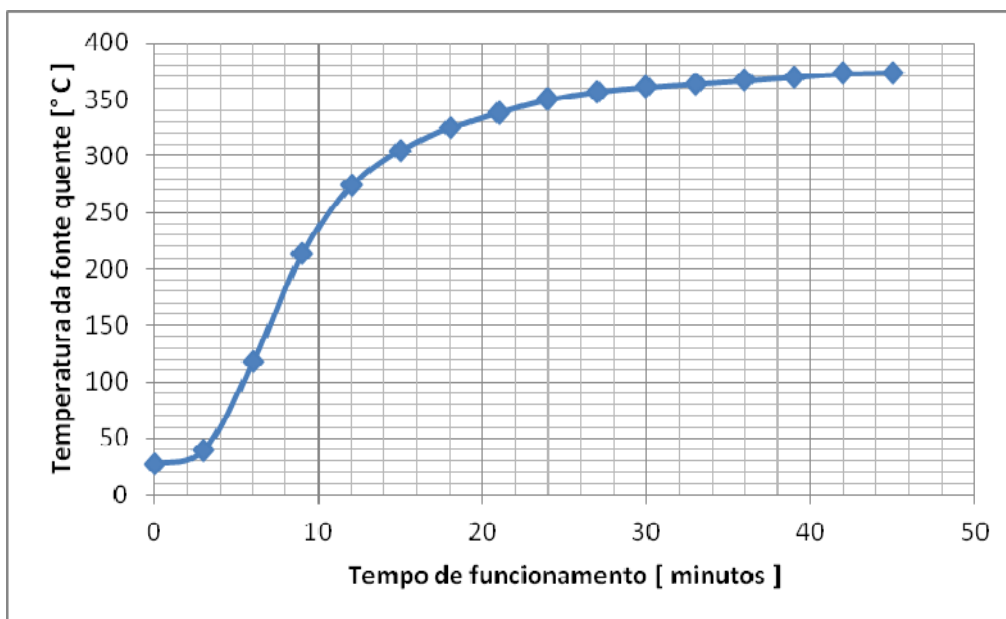


Figura (4.1) – Variação da temperatura da fonte quente em função do tempo de funcionamento com uma resistência elétrica (temperatura ambiente 27° C).

Com apenas uma resistência elétrica instalada observa-se na figura (4.1) que a temperatura máxima alcançada foi de 375 ° C, levando 45 minutos para ser alcançada. Com o aumento da temperatura varia também a rotação do motor que chegou a 260 rpm

na temperatura de 374 °C. O motor iniciou o funcionamento depois de 6 minutos de aquecimento a uma temperatura de 118 °C. A figura (4.2) mostra esta variação da rotação com a temperatura do trocador de calor de aquecimento.

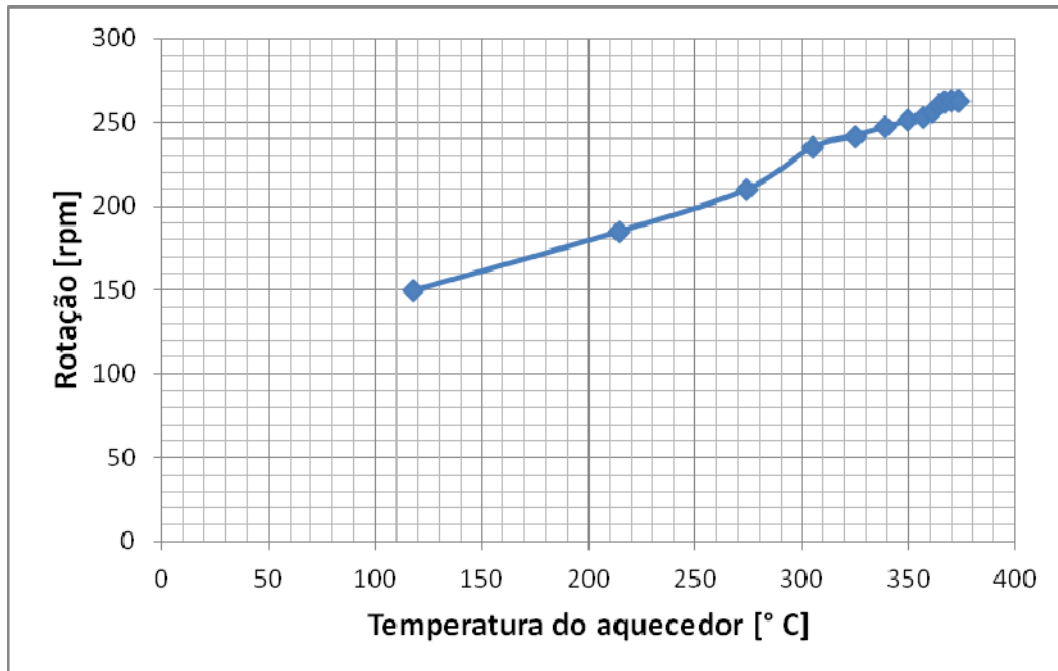


Figura (4.2) - Variação da rotação em função da temperatura do aquecedor com uma resistência (temperatura ambiente 27 °C)

4.2 RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO DUAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS DE 250 W

Com a utilização de duas resistências elétricas para aquecimento do trocador de calor de aquecimento, obtivemos uma temperatura máxima maior, 600 °C, consequentemente, velocidade de rotação maior, 380 rpm. Houve também uma diminuição do tempo de início do funcionamento do motor, aproximadamente 4 minutos. A vazão da água de resfriamento foi mantida em 2,5 litros/minuto.

A figura (4.3) mostra a variação da temperatura do trocador de calor de aquecimento em função do tempo de aquecimento. A variação da rotação em função da temperatura pode ser vista na figura (4.4).

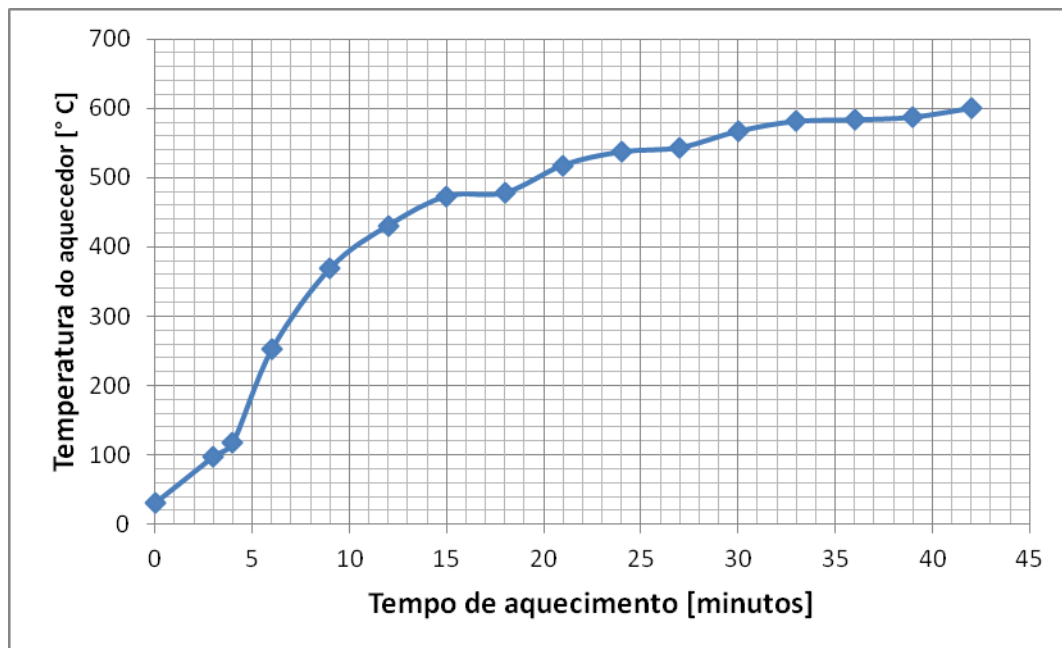


Figura (4.3) – Variação da temperatura da fonte quente em função do tempo de funcionamento com duas resistências elétricas (temperatura ambiente 30 °C).

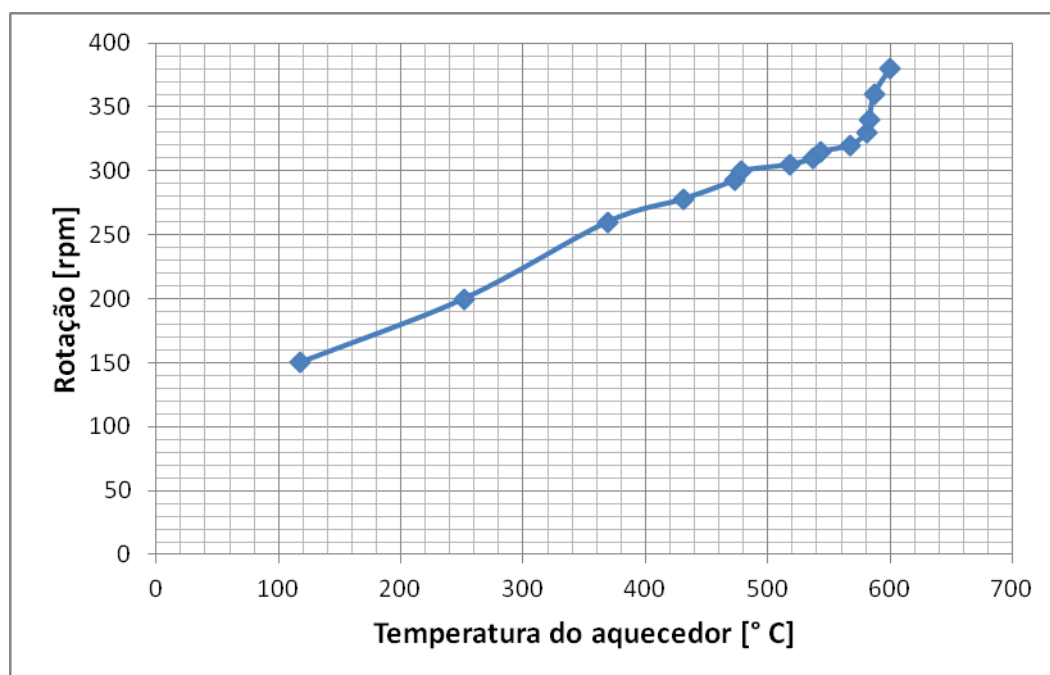


Figura (4.4) - Variação da rotação em função da temperatura do aquecedor com duas resistências (temperatura ambiente 30 °C)

Na determinação do torque do motor foi utilizado o “Freio de Prony”, descrito no capítulo 3. Neste método o cálculo da potência do motor se faz considerando:

Rotação do motor = N (rpm)

Comprimento da haste = L (m)

Leitura da balança = P (kg)

Sendo conhecido o comprimento da haste, o torque foi calculado pela equação 4.1.

$$T = L \times P \quad (4.1)$$

Onde:

T = torque [N.m]

L = comprimento da haste [m]

P = peso medido na balança [N]

Conhecendo-se o torque e a rotação do motor Stirling, pode-se calcular a potência mecânica desenvolvida, através da equação (4.2). A figura (4.5) mostra a variação da potência em função da temperatura do trocador de calor de aquecimento.

$$\text{Potência [W]} = \frac{\text{Torque [N.m]} \times 2\pi \times \text{velocidade angular [rpm]}}{60} \quad (4.2)$$

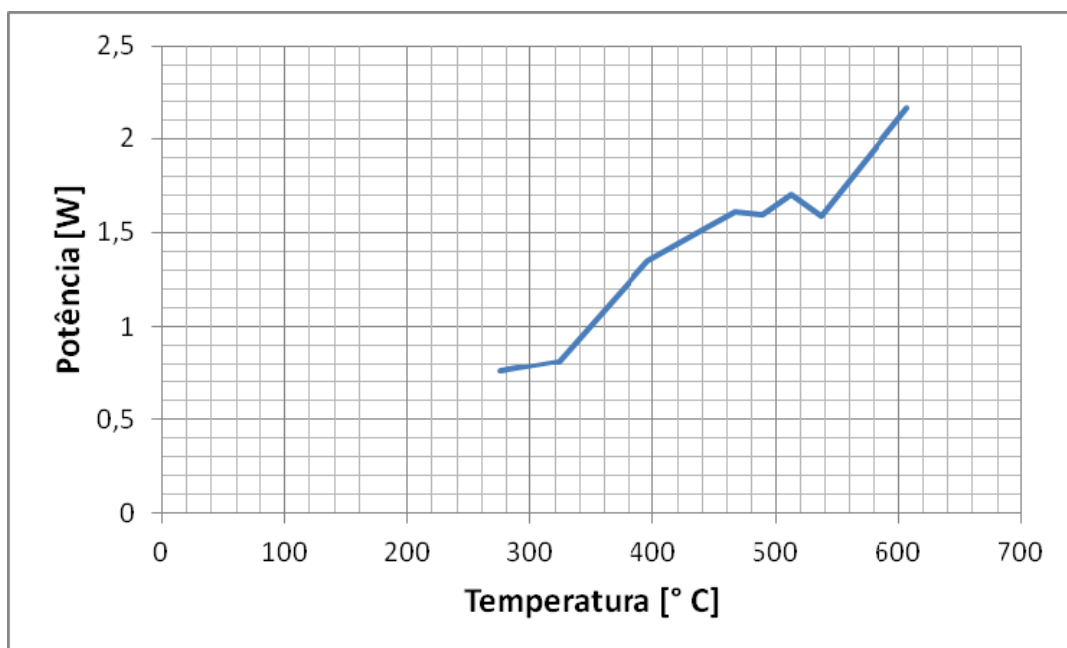


Figura (4.5) – Variação da potência em função da temperatura do trocador de calor de aquecimento.

Observa-se na figura (4.4) o crescimento da potência com o aumento da temperatura, chegando à potência máxima de 2,2 W na temperatura de 600 °C.

A figura (4.5) apresenta a variação do torque e da potência, respectivamente, em função da rotação. O torque máximo ocorreu na rotação de 140 rpm e decresce com o aumento da velocidade. A potência desenvolvida tem valor máximo, 2,2 W na velocidade de, aproximadamente, 183 rpm.

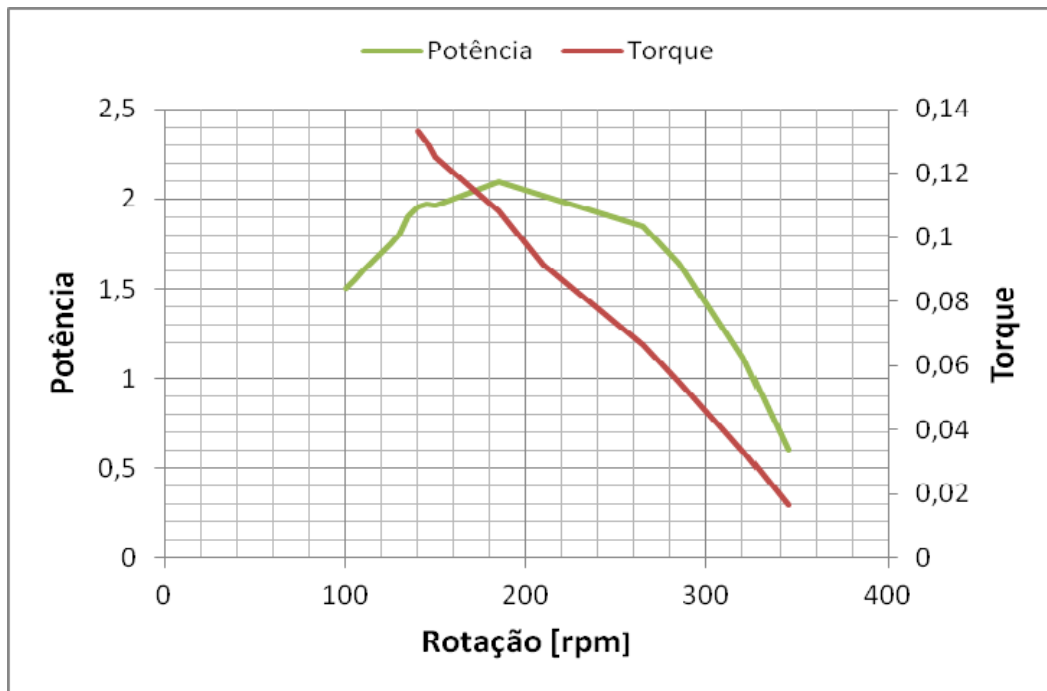


Figura (4.6) – Variação do torque e potência em função da velocidade de rotação

Conhecendo-se a tensão e a corrente, a potência térmica fornecida ao motor através das resistências elétricas, pode ser calculada pela equação (4.3).

$$P_T = V \cdot I \quad (4.3)$$

A potência mecânica calculada pela equação (4.2) pode ser introduzida na equação (4.4) para calcular o rendimento térmico do motor.

$$\eta_{real} = \frac{P_{Mec}}{P_T} \quad (4.4)$$

Portanto, com a potência máxima de 2,2 W, tensão de 220 V e corrente de 1,8 A, temos:

$$Pt = 220 \times 1,8$$

Assim,

$$\eta = \frac{2.2}{396} = 0,55\%$$

4.3 RESULTADOS OBTIDOS PELO TEOREMA DE SCHMIDT

Para analisar os parâmetros construtivos e de funcionamento do motor Stirling desenvolvido, o teorema de Schmidt foi implementado em programa computacional, os gráficos apresentando os resultados podem ser vistos nas figuras (4.7), (4.8) e (4.9).

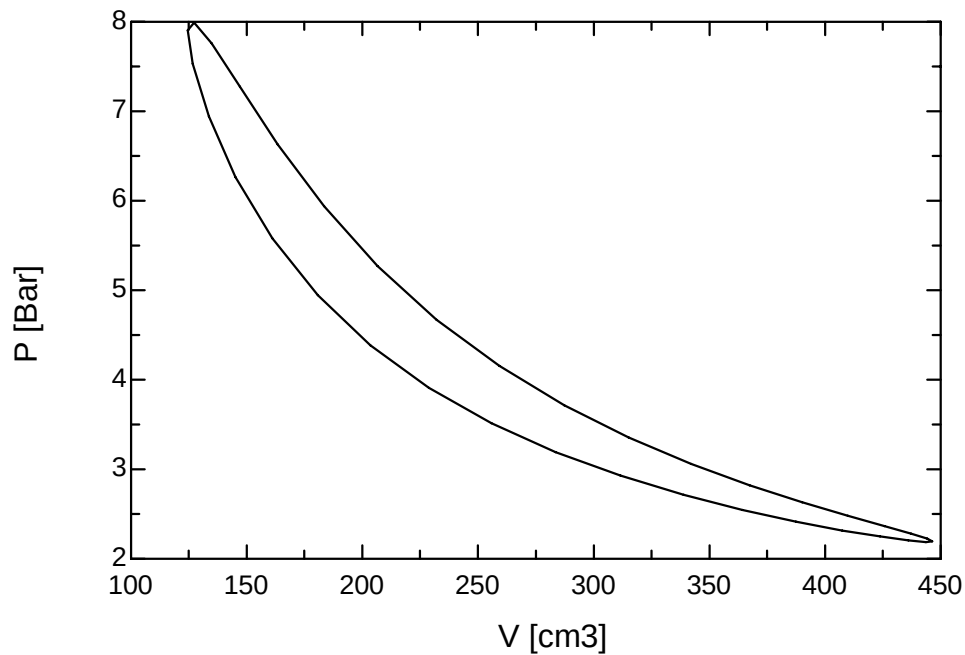


Figura (4.7) – Diagrama pressão x volume obtido por Schmidt

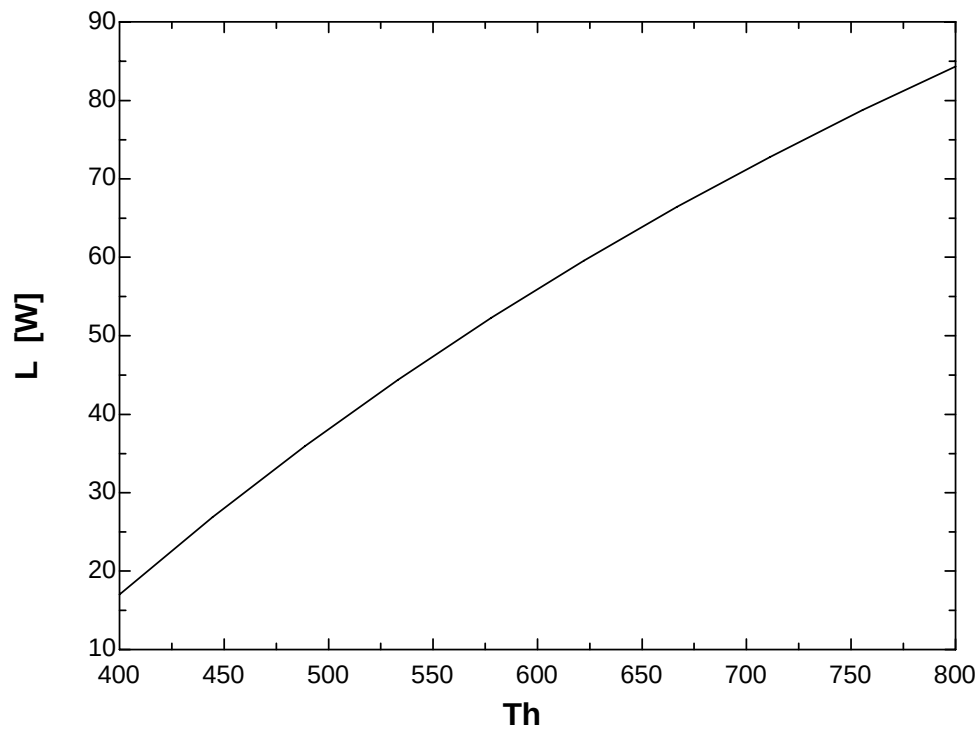


Figura (4.8) – Variação da potência em função da temperatura da fonte quente obtida por Schmidt (400 rpm)

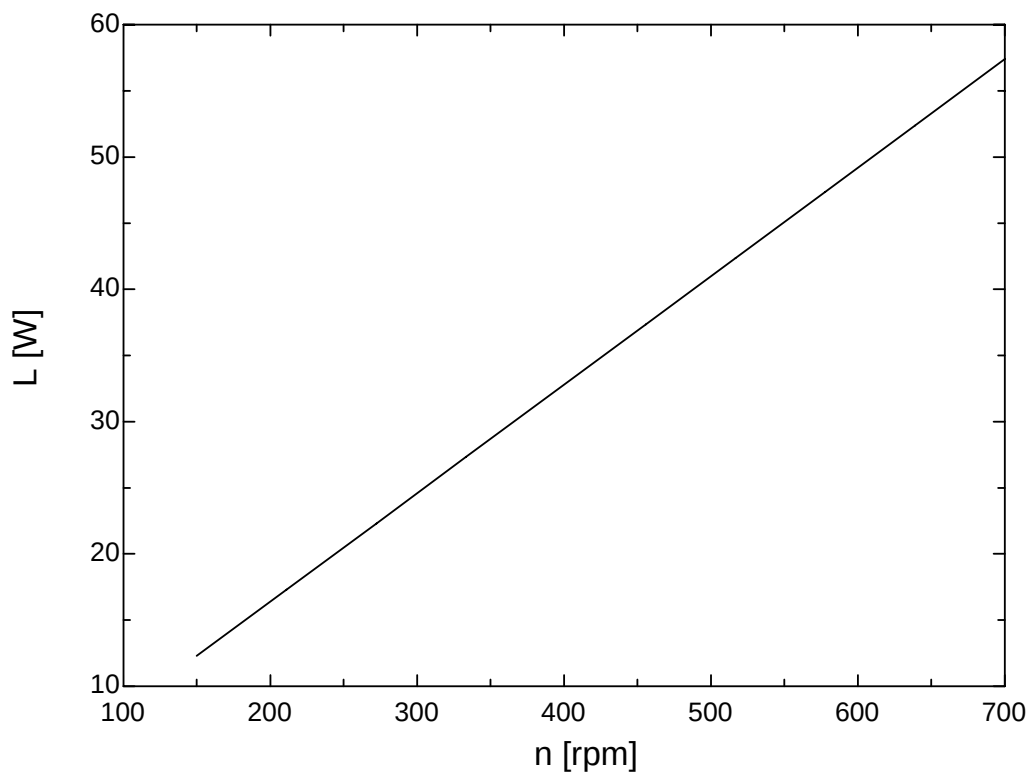


Figura (4.9) - Variação da potência em função da rotação para uma temperatura de 600 °C

4.4 COMPARAÇÃO COM OUTROS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COM OS RESULTADOS ADQUIRIDOS PELO MODELO MATEMÁTICO

A figura (4.6) e (4.10) mostram a variação da potência e do torque em função de velocidade de rotação do motor desenvolvido neste trabalho e o motor desenvolvido por Cinar (2005), respectivamente.

O motor feito por Cinar (2005), na temperatura de 800 °C apresenta maior potência, 1,53 W na rotação de aproximadamente 153 rpm. Já o protótipo objeto deste trabalho, apresenta, para a temperatura de 600 °C e rotação de 183 rpm, uma potência de 2,2 W, demonstrando melhor desempenho, tendo em vista menor temperatura e maior potência de saída. O maior toque obtido pelo motor de Cinar (2005), 0,11 Nm, ocorre a 122 rpm, no protótipo deste estudo, o maior torque ocorre a 140 rpm e é de 0,13 Nm. O motor desenvolvido por Cinar (2005) pode ser usado para comparação, pois é do tipo beta que tem as mesmas características construtivas do protótipo desenvolvido neste trabalho.

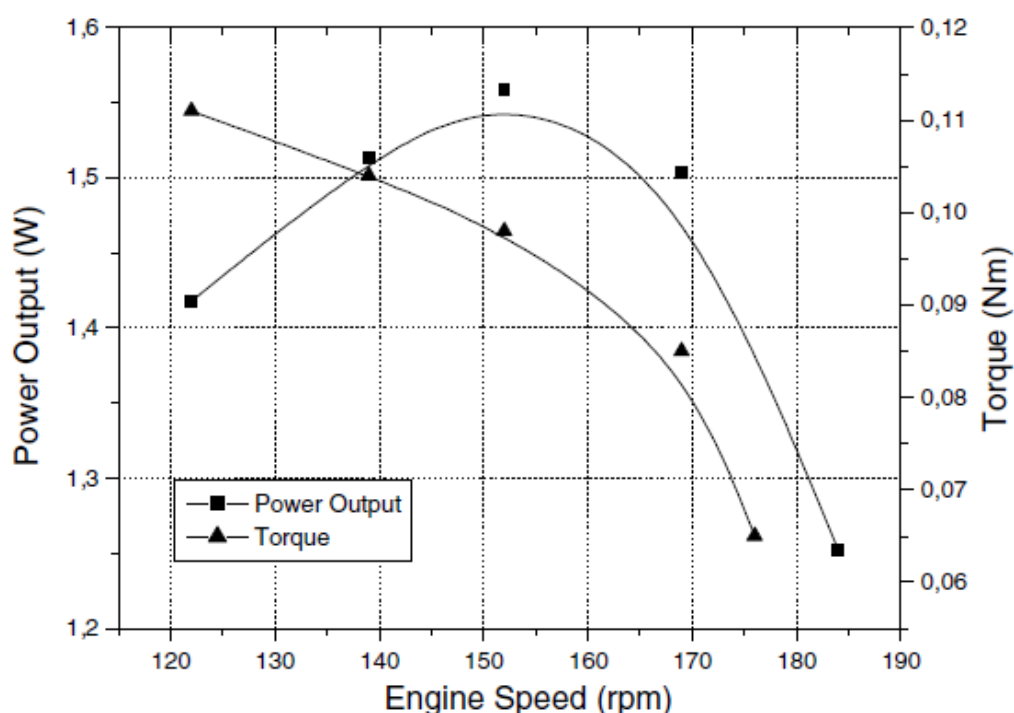


Figura (4.10) – Variação do torque e potência em função da velocidade de rotação com temperatura de 800 °C (CINAR, 2005)

Karabulut et al. (1998), testaram um motor Stirling e mostram os resultados no gráfico da figura (4.11) eles representam a máxima potência do motor em função da carga de pressão, observa-se que para temperaturas abaixo de 750 °C há pouca variação na potência com a pressurização. Pode ser visto também que os motores que funcionam sem pressurização, abaixo de 1bar desenvolvem potências pequenas, como no caso do protótipo deste trabalho que possui potência máxima de 2,2 W.

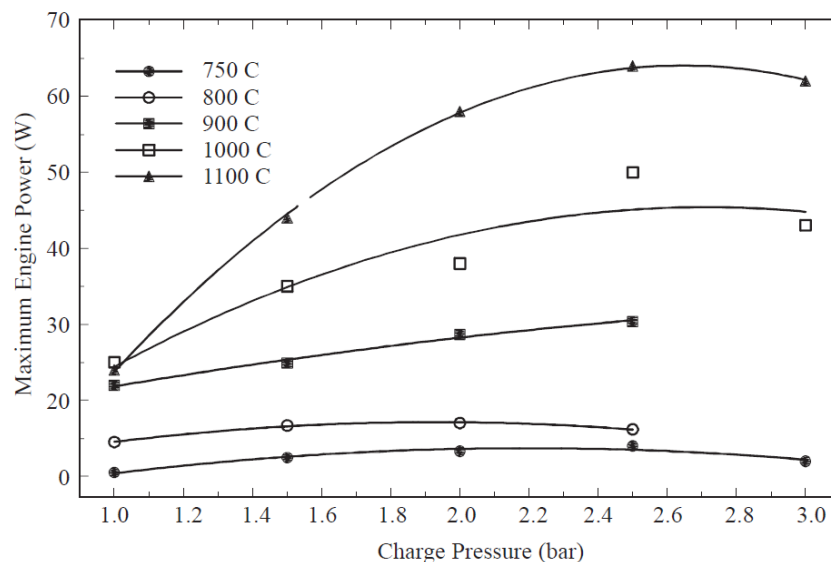


Figura (4.11) – Variação da potência em função da pressão para diferentes temperaturas da fonte quente. (KARABULUT, 1998)

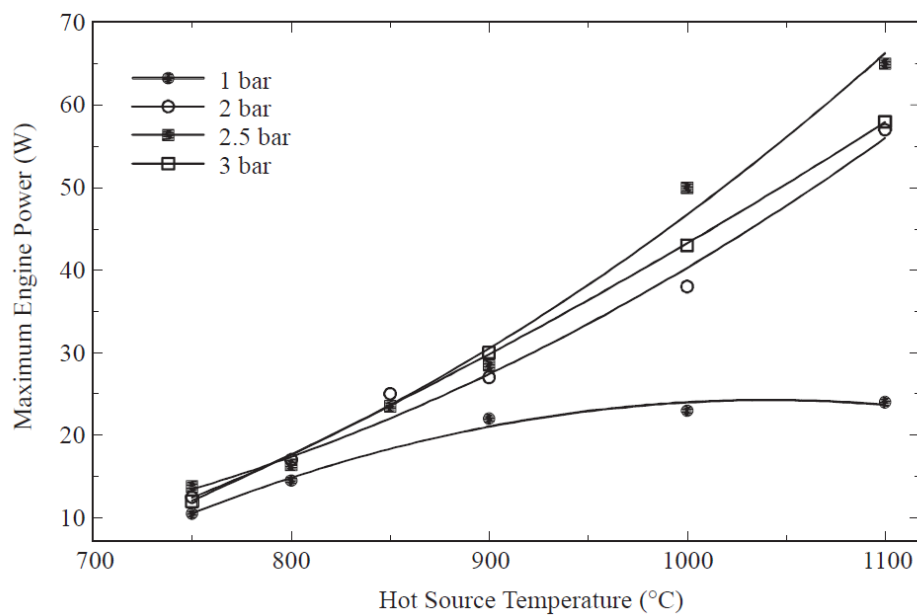


Figura (4.12) - Variação da potência em função da temperatura para diferentes pressões (KARABULUT, 1998)

Através da comparação entre o motor representado na figura (4.12) e o protótipo desenvolvido pode-se confirmar a coerência da potência de saída do protótipo, para pressões abaixo de um bar e temperaturas abaixo de 700 °C a potência do motor é baixa, aproximando-se de zero.

Os resultados adquiridos pelo modelo de Schmidt são mostrados na figura (4.13), onde variação da potência em função da temperatura da fonte quente pode ser vista. Observa-se que os valores diferem bastante dos dados experimentais. Porém, considerando que o modelo de Schmidt é muito idealizado e que considera a temperatura do ar no interior dos trocadores de calor como sendo igual à temperatura das paredes do trocador, estima-se que a temperatura real do fluido de trabalho, no trocador de calor de aquecimento, seja bem mais baixa, o que torna o resultado visto no gráfico mais próximo dos resultados experimentais.

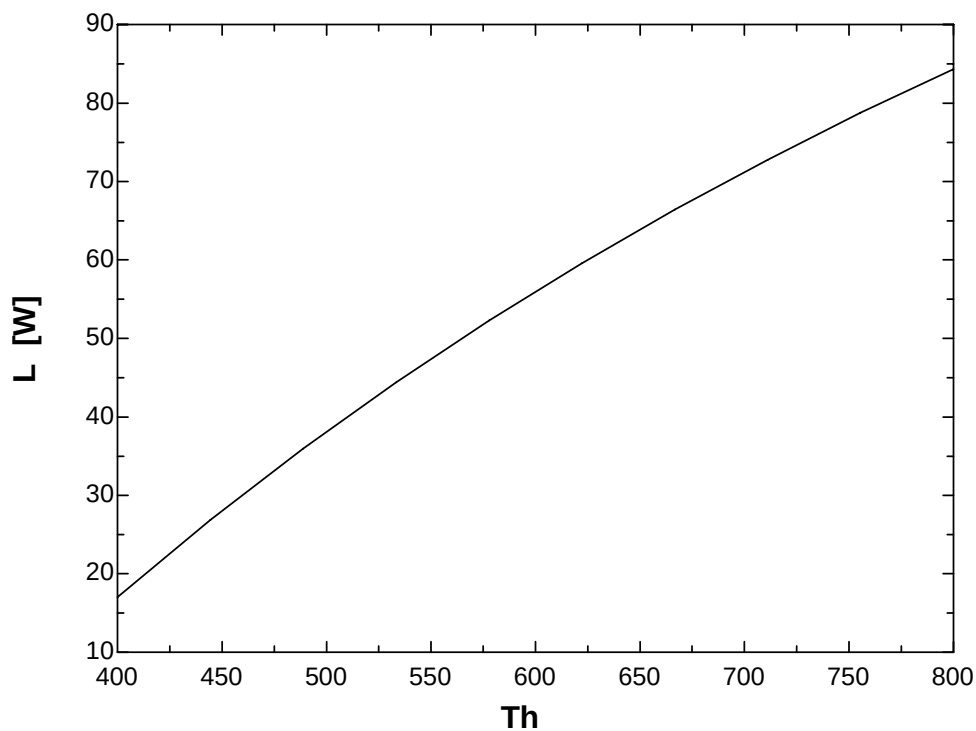


Figura (4.13) – Potência em função da temperatura da fonte quente obtida por Schmidt (400 rpm)

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir dos resultados encontrados através dos testes do protótipo, foi possível obter algumas conclusões a respeito do funcionamento dos motores Stirling.

Observou-se funcionamento estável utilizando tanto a queima de GLP, como também resistências elétricas como fonte de calor. Utilizando apenas uma resistência, o protótipo apresentou uma temperatura máxima menor, em comparação com o uso de duas resistências, e, conseqüentemente, menor rotação e menor potência de saída. O acoplamento de duas resistências de 250 W de potência, proporcionou menor tempo para o início de funcionamento do motor (aproximadamente 4 minutos), menor tempo de aquecimento, temperatura máxima maior, rotação e potência mais elevadas. Entretanto, o uso de duas resistências, reduziu o rendimento do motor.

Pôde-se confirmar a hipótese de funcionamento silencioso, uma vez que não há explosão e os ruídos detectados são produzidos apenas por folgas nos mecanismos, o que pode ser corrigido através de um melhor ajuste entre as peças. Confirmou-se também o funcionamento estável e construção relativamente simples.

A potência máxima desenvolvida foi 2,2 W a 183 rpm e temperatura de 600 °C, esta potência é coerente, em comparação com os dados experimentais adquiridos nos testes de outros motores do mesmo porte. Esta comparação mostra a necessidade de se trabalhar com temperaturas e pressões mais elevadas para que sejam adquiridas potências maiores, pois motores produzidos com as mesmas dimensões produzem potências muito mais elevadas com o aumento da pressão de trabalho e da temperatura do aquecedor. Outro fator importante observado nos motores de maior potência é a utilização de fluidos de trabalho diferentes.

O rendimento do motor não foi satisfatório, 0,55 %, em comparação com outros resultados experimentais encontrados na literatura, 30 % a 40 %. Os resultados de outros trabalhos reforçam a necessidade do aumento da temperatura e da pressão de trabalho, pois, com isso, observa-se um aumento significativo do rendimento.

O modelo de Schmidt não apresentou aproximação satisfatória em relação aos resultados experimentais, sobretudo na potência de saída, porém considerando que o teorema é muito idealizado e que o mesmo considera a temperatura do fluido de trabalho como sendo igual à temperatura dos trocadores de calor, fato que não se observa na prática. Desta forma, pode-se supor que a temperatura interna do trocador de calor de aquecimento é bem inferior, chegando a resultados mais próximos dos reais. O

teorema mostrou-se útil, especialmente, nas etapas iniciais do projeto, relacionando os parâmetros de construção e de funcionamento do motor.

O fato de ser um motor de combustão interna e possibilitarem a utilização de grande variedade de tipos de combustíveis torna os motores Stirling muito atrativo na atualidade. Esta tecnologia é bastante atrativa para geração de potência, sobretudo em aplicações isoladas da rede elétrica. Em locais onde se tem geração de resíduos que podem ser aproveitados para a queima, como por exemplo, resíduos de madeira, o uso de motores Stirling é bastante interessante.

Embora diversas modificações possam ser feitas para melhorar o rendimento e, conseqüentemente a potência de saída, o protótipo incentiva o desenvolvimento de outras unidades de maior eficiência e potência e que possam ser alimentados através da outras fontes de calor, inclusive energia solar, promovendo uma diminuição da utilização dos combustíveis fósseis e aumento do uso de fontes de energia renováveis.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Várias modificações e testes podem ser realizados na tentativa de melhorar o rendimento e a potência do motor. As seguintes modificações e testes podem servir com sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar testes utilizando pressões mais elevadas;
- Utilizar fluidos de trabalho diferentes do ar;
- Otimizar a relação de volumes entre o pistão de potência e o pistão deslocador;
- Desenvolver trocadores de calor mais eficientes para alcançar temperaturas mais altas do fluido de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATAER, E., KARABULUT, H. *Thermodynamic analysis of the V-type Stirling-cycle refrigerator*. International Journal of Refrigeration, v. 28, p. 183–189, 2005.
- BARROS, R. W. *Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo161 Operando com Diferentes Combustíveis*. Itajubá, 2005. 143 p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2005.
- BATMAZ, I., USTUN, S., *Design and manufacturing of a V-type Stirling engine with double heaters*. Applied Energy, v. 85, p. 1041–1049, 2008.
- CINAR C., YUCESU S., TOPGUL T., OKUR M., *Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure*. Applied Energy, v. 81, p. 351-357, 2005.
- FINKELSTEIN, T., ORGAN, A. J., *Air Engines*. Professional Engineering Publish Limited, London, 2001.
- HIRATA K., *Schmidt theory for stirling engines*. National Maritime Research Institute – Tokyo – Japão, 1997.
- KARABULUT, H., SERDAR, H., KOCA, 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.
- KONGTRAGOOL, B., WONGWISES, S., *A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 7, p. 131-154, 2003.
- 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 Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 13, p. 27-36, 2009.
- MARTINI, W. R., *Stirling Engine Design Manual*. Honolulu, University Press of the Pacific, 2004.
- PAULA, R. B., *Projeto e avaliação teórica e experimental de sistemas de geração de eletricidade a partir da biomassa utilizando motores Stirling*, 2007. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2007.
- SCOLLO, L., VALDEZ, P., BARON, J., *Design and construction of a Stirling engine prototype*. International Journal of Hydrogen Energy, v. 33, p. 3506 – 3510, 2008.

- SHENDAGE, D. J., KEDARE, S. B., BAPAT, S. L., *An analysis of beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism*. Renewable Energy, v. 36, p. 289-297, 2010.
- TARAWNEH, M., AL-GHATHIANB, F., NAWAFLEHC, M. A., “*Numerical Simulation and Performance Evaluation of Stirling Engine Cycle*. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, v. 4, p. 615 – 628, 2010
- TAVAKOLPOUR, A. R.; ZOMORODIAN, A.; GOLNESHAN, A. A., *Simulation, construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator*. Renewable Energy, v. 33, p. 77-87, 2008.
- THOMBARE, D.G.; VERMA, S. K.; 2006, *Technological development in the Stirling cycle engines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 12, p. 1-38, 2008.
- TLILI, I., TIMOUMI, Y., NASRALLAH, S. B., *Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application*. Renewable Energy, v. 33, p. 1911-1921, 2008.
- VALDEZ, L. S. P., BARON, J., *Design and construction of a Stirling engine prototype*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 10, p. 121-142, 2007.