

## **SOLARIUM: DIMENSIONAMENTO DE UMA MÁQUINA TÉRMICA UTILIZANDO UM CONCENTRADOR SOLAR COMO FONTE, SEGUNDO O CICLO STIRLING**

RENÉE ISRAEL<sup>1\*</sup>, AUGUSTO F. TOBIAS<sup>2</sup>, ALEX SANDRE GUEDES ALVES<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Estudante de Pós Graduação, Estácio de Belém, PA, renee.israel.pa@gmail.com

<sup>2</sup> Bacharel de Eng. Mecânica, Estácio de Belém, PA, augusto.engmec@outlook.com

<sup>3</sup> Prof. de Eng. Mecânica, Estácio de Belém, PA, alex.alves@estacio.br

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2017  
8 a 11 de agosto de 2017 – Belém-PA, Brasil

**RESUMO:** Com a prioridade de dimensionar uma máquina térmica em função da necessidade energética do sistema se utilizará a teoria de Schmidt para motores Stirling para obtenção dos valores de volumes e pressões durante o ciclo, construindo a partir desses resultados o gráfico  $P_v$ . Serão comentadas as razões da escolha do motor tipo gama em comparação as outras opções.  
**PALAVRAS-CHAVE:** dimensionamento, máquina térmica, teoria de Schmidt, ciclo Stirling

## **SOLARIUM: DIMENSIONING OF A THERMAL MACHINE USING A SOLAR CONCENTRATOR AS SOURCE, OPERATING TO STIRLING CYCLE**

**ABSTRACT:** With of priority dimensioning a thermal machine according to the energetic necessity of the system to using the theory of Schmidt for Stirling engines to obtain the values of volumes and pressures during the cycle; constructing from these results the graph  $P_v$ . Will be commented the reasons for choosing the type gamma engine over compared other options.

**KEYWORDS:** dimensioning, thermal machine, Schmidt theory, Stirling cycle

## **INTRODUÇÃO**

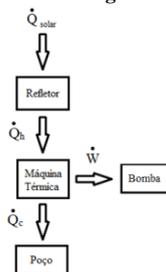
A construção de uma máquina térmica para um projeto requer conhecimentos teóricos e técnicos, além de informações de dados locais como potência requerida para o sistema e possíveis particularidades como restrições ou premissas e de trabalhos científicos similares que norteiam as características do sistema que será integrado no projeto *Solarium*. O sistema foi idealizado por Tobias et al. (2016) e todas as informações contidas nele serão utilizadas.

## **METOLOGIA**

A máquina térmica escolhida é um motor de combustão externa que funciona a partir da captação de energia solar por um concentrador parabólico, como mostra a figura 1. A irradiação solar se concentrará no ponto focal do refletor, onde será posicionada a câmara quente do motor e fornecerá energia à máquina e consequentemente sua energia mecânica acionará uma bomba hidráulica. O motor segue o ciclo termodinâmico de Robert Stirling.

Haja vista que o motor utilizará com uma fonte externa de calor para seu funcionamento, o mesmo possuirá perdas e seu movimento não aproveitará toda a energia solar vinda do refletor, como Santos (2012) resalta. Portanto, serão aplicados no decorrer do estudo às análises ideal e real do ciclo Stirling com os objetivos de caracterizar o sistema global e do dimensionamento do motor, respectivamente.

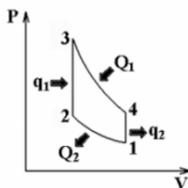
**Figura 1. Fluxo de energia. Autores, 2016.**



### Ciclo Termodinâmico

A partir do ciclo ideal de Stirling, fig. 2, verifica-se os seguintes pontos do sistema dentro do gráfico  $Pv$  e se conclui que o sistema possuirá dois processos isotérmicos ( $Q_x$ ) e dois isocóricos ( $q_x$ ):

**Figura 2. Gráfico  $Pv$  do ciclo ideal de Stirling (Cruz, 2012)**



1 – 2: Compressão isotérmica (temperatura baixa,  $T_c$ ), acionamento do pistão de deslocamento do motor;

$$Q_{12} = W_{12} = n R T_c \ln\left(\frac{V_m}{V_M}\right) \quad (1)$$

2 – 3: Injeção de calor a volume constante, aquecimento provocação pela concentração solar no absorvedor (ponto focal);

$$q_{23} = \Delta U = n C_v (T_h - T_c) \quad (2)$$

3 – 4: Expansão isotérmica (temperatura alta,  $T_h$ ), movimento do pistão de potência para gerar trabalho;

$$Q_{34} = W_{34} = n R T_h \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) \quad (3)$$

4 – 1: Rejeição de calor a volume constante e reabertura da válvula direcional;

$$q_{41} = \Delta U = n C_v (T_c - T_h) \quad (4)$$

Análise preliminar do sistema é aplicado a 1ª lei da termodinâmica no ciclo Stirling e a razão entre volumes máximo e mínimo proposto por Puech e Tishkova (2011):

$$V_M = V_{sw} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \quad (5)$$

$$V_m = V_{sw} \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \quad (6)$$

Realizada a análise, um cálculo isotérmico poderá ser obtido com as equações descritas. Logo, obtêm os valores da primeira etapa do projeto a energia total e a potência do sistema de 7,35 kJ e 3,68 kJ, respectivamente. Entretanto, tais valores não poderão ser utilizados no dimensionamento, pois o cálculo termodinâmico é ideal e tornaria as dimensões da máquina

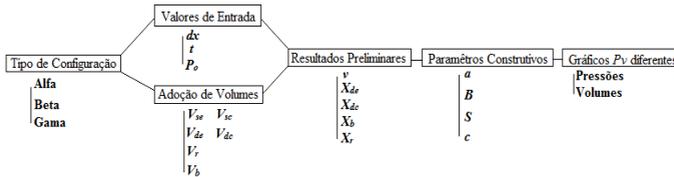
exacerbada.

Mesmo assim concluiu-se que as pressões máxima e mínima, além do trabalho, potência e eficiência são influenciadas pelas temperaturas de operação do sistema,  $T_h$  e  $T_c$ . Logo, serão realizados cálculos no modo pessimista para o dimensionamento e aplicada à teoria de Schmidt para dimensionamento dos motores Stirling.

### Teoria de Schmidt

A teoria mostrada por Hirata (1995) utiliza de uma formulação matemática para os três tipos de motores Stirling (alfa, beta e gama). Razão que faz que os resultados se tornem sensíveis aos parâmetros construtivos e aos valores de volumes adotados, como fica evidente no fluxo da Fig.3.

**Figura 3. Fluxo de incógnitas presentes na teoria de Schmidt. Autores, 2016.**



Possuindo como base outros trabalhos similares como Santos (2012), Pautz (2013) e Alemán (2015), que aplicaram da mesma teoria em seus respectivos trabalhos e obtiveram resultados diferentes devido às configurações adotadas do motor, fig. 4. Logo, se concluiu que dependendo da escolha do tipo da máquina os resultados esperados de trabalho, rotação e pressões seriam diferentes e o gráfico gerado seriam um gráfico real.

**Figura 4. Formulação matemática da teoria de Schmidt. Adaptado pelos autores.**

	Alfa	Beta	Gama
$a$	$tg^{-1} \frac{v \operatorname{sen} dx}{t + \operatorname{cos} dx}$	$tg^{-1} \frac{v \operatorname{sen} dx}{t + \operatorname{cos} dx + 1}$	$tg^{-1} \frac{v \operatorname{sen} dx}{t + \operatorname{cos} dx + 1}$
$S$	$t + 2t X_{de} + v + 2 X_{dc} + \frac{4t X_c}{1+t}$	$t + 2t X_{de} + v + 2 X_{dc} + \frac{4t X_c}{1+t} + 1 - 2X_b$	$t + 2t X_{de} + v + 2 X_{dc} + \frac{4t X_c}{1+t} + 1$
$B$	$\sqrt{t^2 + 2tv \operatorname{cos} dx + v^2}$	$\sqrt{t^2 + 2(t-1)v \operatorname{cos} dx + v^2 - 2t + 1}$	$\sqrt{t^2 + 2(t-1)v \operatorname{cos} dx + v^2 - 2t + 1}$
$c$	$\frac{B}{S}$	$\frac{B}{S}$	$\frac{B}{S}$
$I'_e$	$\frac{V_{se}}{2} (1 - \operatorname{cos} x) + V_{de}$	$\frac{V_{se}}{2} (1 - \operatorname{cos} x) + V_{de}$	$\frac{V_{se}}{2} (1 - \operatorname{cos} x) + V_{de}$
$I'_c$	$\frac{V_{sc}}{2} [1 - \operatorname{cos}(x - dx)] + V_{dc}$	$\frac{V_{sc}}{2} (1 + \operatorname{cos} x) + \frac{V_{sc}}{2} [1 - \operatorname{cos}(x - dx)] + V_{dc}$	$\frac{V_{sc}}{2} (1 - \operatorname{cos} x) + V_{dc}$
$I'_b$	—	$\frac{V_{se} + V_{sc}}{2} - \sqrt{\frac{V_{se}^2 + V_{sc}^2}{4} - \frac{V_{se} V_{sc}}{2} \operatorname{cos} dx}$	—
$I'$	$V'_e + V'_c + V'_b$	$V'_e + V'_c + V'_b + V'_b$	$V'_e + V'_c + V'_c$
$P$	$\frac{P_0 \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \operatorname{cos}(x - a)}$	$\frac{P_0 \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \operatorname{cos}(x - a)}$	$\frac{P_0 \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \operatorname{cos}(x - a)}$
$E$	$\frac{P_0 V_{se} \pi c (1 - t) \operatorname{sen} a}{1 + \sqrt{1 - c^2}}$	$\frac{P_0 V_{se} \pi c (1 - t) \operatorname{sen} a}{1 + \sqrt{1 - c^2}}$	$\frac{P_0 V_{se} \pi c (1 - t) \operatorname{sen} a}{1 + \sqrt{1 - c^2}}$
$n$	$\frac{E}{W}$	$\frac{E}{W}$	$\frac{E}{W}$

Portanto inicialmente, os parâmetros adotados foram condizem com pistões padronizados. Assim, a teoria foi usada como ferramenta para caracterização de volumes máximo e mínimo, pressões, energia disposta e rotação da máquina térmica. Sendo assim, obtido um gráfico de pressão por volume com os mesmos valores de entrada.

Costa (2013) reforça que o gráfico real é diferente do ideal devido à dificuldade de obter processos puramente isotérmicos, não havendo perdas durante o ciclo. Costa comenta ser indispensável o controle da temperatura de operação e pressão média, assim como volume morto

e o curso do pistão. Pois em condições reais de funcionamento haverá perdas por calor e atrito, fazendo o rendimento e eficiência diminuírem.

Contudo, Sripakagorn e Srikam (2011) descrevem outros fatores restritivos de dimensionamento: como o fluido de trabalho, as dimensões do motor e a escolha dos materiais construtivos resultam em alterações de eficiência do ciclo Stirling. Logo, para um estudo que utilize um baixo orçamento poderá usar como premissas os fatores restritivos já citados, com objetivo de suprir a necessidade energética do local de instalação. No projeto, as particularidades são a mobilidade do módulo do motor e seu baixo custo de fabricação.

### Particularidades

O projeto *Solarium* objetivou uma proposta de custo-benéfico que oferecesse um bom aproveitamento do sistema, assim como a construção do mesmo ser a baixo custo, ou seja, dentro das condições da comunidade. Em razão dessas considerações, o motor terá como fluido de trabalho o ar e não possuirá regenerador.

Alguns fatores para escolha do motor são funcionamento irregular devido a vazamentos (escape de ar) e a configuração adequada para a localidade. Muitos motores experimentais não tiveram bom desempenho devido a vazamentos entre o pistão e a haste. Para solucionar tal falha, possíveis na construção do motor terão de ser verificados pontos de vedação nos cilindros de compressão e expansão.

A razão do motor pode ser um módulo móvel é um fator crucial, pois a fonte fria pode ser um recurso finito ou de difícil acesso na localidade. Além da fabricação do mesmo ser de baixo custo, sem grandes dificuldades construtivas. Ou seja, são apresentadas as características de cada configuração na tabela 1:

**Tabela 1. Características de cada tipo de motor Stirling**

	Vazamento	Dificuldade de Construção	Sistema Global
<b>Alfa</b>	Alta	Baixa	Dificuldade de transmitir energia
<b>Beta</b>	Pouco	Alta	Construir em baixo custo
<b>Gama</b>	Existente	Baixa	Pistão de expansão terá que ter uma haste maior devido ao ponto focal do refletor

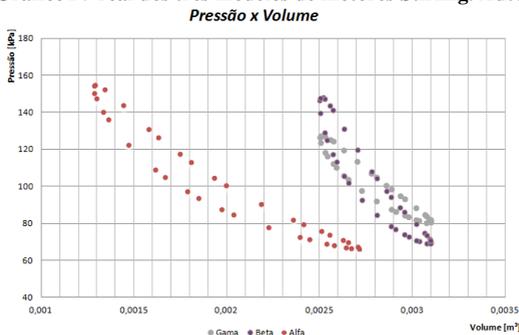
### RESULTADOS

A obtenção dos gráficos de pressão por volume da máquina térmica, contidos na fig.5, se baseou em valores de entrada como sendo descritos a abaixo:

**Tabela 2. Valores de entrada**

Dados de Entrada	Siglas	Valor	Unidade
Curso do pistão	L	20	cm
Diâmetro do Pistão de Deslocamento	$d_1$	10,093	cm
Diâmetro do Pistão de Potência	$d_2$	6,1804	cm
Vol. Percorrido pelo Pistão de Deslocamento	$V_{se}$	0,0016	$m^3$
Vol. Morto de expansão	$V_{de}$	0,0007	$m^3$
Vol. percorrido pelo Pistão de Potência	$V_{sc}$	0,0006	$m^3$
Vol. Morto de compressão	$V_{dc}$	0,0002	$m^3$
Pressão	$P_o$	101325	Pa
Ângulo de Fase	$dx$	90	°
Potência do Sistema	W	32	W
Temperatura no ponto focal	$T_h$	544	K
Temperatura da fonte fria	$T_c$	293	K

**Figura 5. Gráfico  $Pv$  real dos três modelos de motores Stirling. Autores, 2016.**



A opção pela fabricação do motor tipo gama condiz com as condições empregadas no projeto: construção mais barata; melhor configuração junto ao sistema global. Contudo, sua faixa de pressão é a menor dos que os demais; porém, pode-se ter o melhor controle das pressões e das temperaturas de operação. Resultando na vedação necessária das câmaras do motor.

## CONCLUSÃO

O projeto de dimensionamento do motor Stirling se mostra plausível tanto construtivas quanto em utilizar de suas particularidades para elevar a eficácia da máquina térmica.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos familiares, amigos e a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente estiveram envolvidas no sucesso deste projeto. Um agradecimento especial ao professor Alex Guedes que sempre esteve disponível para sanar dúvidas e sugerir novas ideias.

## REFERÊNCIAS

- Alemán, J.A.R. 2015. Diseño y construcción de un motor Stirling tipo beta acoplado a un concentrador solar parabólico cóncavo. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Costa, J.M.S. 2013. Metodologia simplificada para a análise termoeconômica de sistemas de cogeração com motor Stirling. Universidade do Minho.
- Cruz, V.G. 2012. Desenvolvimento Experimental de um Motor Stirling tipo Gama. Universidade Federal da Paraíba. Brasil.
- Hirata, K. 1995. Schmidt theory for Stirling Engines. National Maritime Research Institute.
- Pautz, E. R. 2013. Estudo e projeto de um motor Stirling. Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ).
- Puech, P. and Tishkova, V. Thermodynamic Analysis of a Stirling Engine Including Regenerator Dead Volume. *Renewable Energy* 36 (2011) 872 – 878.
- Sripakagorn, A. and Srikam, C. 2011. Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine. *Elsevier/Renewable Energy* 36
- Santos, M.R.C. 2012. Estudo de um sistema de cogeração com motor Stirling e concentrador solar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).
- Tobias, A.; Israel, R.; Pacheco, C. E.; Alves, A. S. G. 2016. Solarium: Máquina Térmica Solar para Aplicação em Comunidades Isoladas da Amazônia. Trabalho de conclusão de curso. Bacharel em Engenharia Mecânica. Estácio de Belém, Pará.