

METODOLOGIA PARA PREVISÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE MOTORES STIRLING

Isadora F. Lara, isadoraflara@gmail.com.br¹

Bryan C. Caetano, bcastrocaetano@gmail.com²

Oscar R. Sandoval, osc.sandoval@hotmail.com²

Ramon M. Valle, ramon@demec.ufmg.br²

¹Colegiado de Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil

Resumo: A regulamentação da distribuição de energia a partir de grandes centros de produção permite atualmente a formulação e construção de centrais descentralizadas para geração de energia, principalmente para centros urbanos afastados das grandes cidades. O motor Stirling vem sendo novamente utilizado devido a sua capacidade de trabalhar com o aproveitamento de fontes de energia térmica externa, o que determina o uso de inúmeras fontes renováveis de energia. Por tal motivo, existe a necessidade de usar modelos teóricos para previsão de potência em motores Stirling que permitam reduzir o custo de projeto e desenvolvimento desse tipo de equipamento. Neste trabalho, é desenvolvida uma metodologia para entender as primeiras etapas do dimensionamento de um motor Stirling. Os modelos aqui abordados permitem, a partir do uso de dados de projeto, uma estimativa do desempenho do motor. Três modelos de previsão são implementados em um programa elaborado na plataforma LABVIEW. São avaliados modelos de primeira ordem e modelos semi-empíricos. Os modelos analisados são o modelo de Schmidt, o número de Beale, e o semi-empírico proposto por Iwamoto. Por fim, mediante a análise de diversas referências disponíveis na literatura, uma alteração no modelo de Iwamoto é apresentada e comparada com resultados experimentais de um motor Stirling da literatura.

Palavras-chave: Previsão de desempenho, Ciclo Stirling, Modelagem teórica, Stirling.

1. INTRODUÇÃO

A comunidade internacional têm duas grandes preocupações no século XXI. A primeira é conseguir atingir adequadamente um ponto de equilíbrio na demanda atual da energia elétrica no mundo, fazendo com que essa demanda não coloque em situação de risco os interesses das gerações futuras. Para isso, torna-se de vital importância a construção de um método sustentável para a produção e o consumo da energia mundial (Dincer, 2000). A segunda preocupação é manter a melhoria dos serviços prestados pela indústria energética, bem como a prioridade para alcançar as regiões isoladas. Para essa última, tem sido implementada a desregulamentação dos sistemas de distribuição energética, dando passo a sistemas de geração ou cogeração distribuída.

A geração distribuída de energia consiste em um conceito revolucionário que toma forma na geração local de energia elétrica em pequena escala, seja térmica e/ou mecânica (Deng *et al.*, 2017; Pilavachi, 2002). Esta geração local poderia estar em uma área remota, geralmente com baixa capacidade de transmissão, onde a construção de estações distribuídas pode ser mais vantajosa do que construir grandes usinas com longas linhas de transmissão (Sadeghierad *et al.*, 2010). Um exemplo dessas regiões é a região amazônica do território brasileiro, onde a distribuição de energia convencional é prejudicada pelo grande investimento financeiro e as longas distâncias que tornam o acesso muito difícil (Macedo *et al.*, 2016).

Alguns sistemas utilizados para esse tipo de aplicação, seja residencial, comercial ou institucional na geração distribuída são, o motor de combustão interna, micro-turbinas, células de combustível e motores Stirling (Onovwiona and Ugursal, 2006).

O motor Stirling, caracterizado por possuir entrada de calor externo, permite o aproveitamento das mais diversas fontes de energia do planeta, sendo principalmente utilizadas fontes como a radiação solar, a energia a partir de biocombustíveis, biomassas e combustíveis fósseis (Scollo *et al.*, 2008). Esta participação no cenário energético se dá pela sua versatilidade de operação, já que pode ser configurado para possuir um ciclo regenerativo fechado que oferece incrementos significativos na eficiência térmica, uma característica importante quando comparado com motores de combustão interna do ciclo Otto ou Diesel. Ainda assim, uma das barreiras que faz da tecnologia Stirling incógnita nas indústrias de conversão de energia, é o alto preço de desenvolvimento e construção de um protótipo, o qual chega a ser cerca de três vezes maior que de outros geradores, principalmente os solares. No entanto, pesquisas recentes descrevem que a produção em massa do motor Stirling teria um impacto direto sobre os custos de projeto, podendo se tornar uma alternativa viável a ser ex-

plorada (Hussain *et al.*, 2017). Com essa premissa, torna-se necessário o estudo constante para desenvolver ferramentas computacionais que permitam otimizar o motor Stirling, a fim de obter altos índices de desempenho pelo menor custo possível.

Diversas são as formas para realizar uma previsão dos parâmetros de desempenho de um motor Stirling. Os modelos teóricos são caracterizados segundo os métodos de cálculo utilizados, existindo modelos que usam como base as leis de conservação de massa, momento linear e energia total do sistema. Cada uma dessas abordagens oferece um grau de complexidade diferente (Malroy, 1998).

A classificação dos modelos de previsão pela sua complexidade matemática foi proposta por Martini (1978). Nessa classificação, é utilizada uma escala de primeira, segunda, e terceira ordem, onde os últimos agrupam os modelos que possuem um detalhamento matemático muito mais complexo. Neste trabalho são apresentados modelos de primeira ordem, por se tratar de uma metodologia para o dimensionamento inicial de um motor Stirling. Assim, o primeiro modelo discutido é o de Schmidt, o qual utiliza a lei de conservação de massa (Hirata, 1997). O segundo é um modelo semi-empírico proposto por Iwamoto *et al.* (2001) e o terceiro, usa o modelo de previsão a partir do número de Beale exposto pelos autores Aladayleh and Alahmer (2015). Os dois últimos modelos, semi-empírico e número de Beale, utilizam números adimensionais e regressões obtidas por valores experimentais.

Os modelos de segunda ordem são numéricos e complexos, e os modelos de terceira ordem requerem uma alta potência de processamento computacional, que nem sempre é proporcional à precisão dos resultados obtidos através deles, por isso, não são inclusos neste trabalho. Sendo assim, é indispensável buscar uma forma de simplificar e melhorar a previsão de desempenho de motores Stirling, assim como, criar novas metodologias que possam auxiliar seu desenvolvimento, o que pode ser feito a partir da análise de modelos de primeira ordem e semi-empíricos.

1.1 Modelo de Schmidt

Uma das primeiras formas de análise de um ciclo de Stirling real é o modelo de Schmidt, o qual serve como base para vários outros modelos termodinâmicos. O modelo de Schmidt é o modelo mais completo dentre os que podem ser resolvidos analiticamente (Martini, 1980), já que apenas a lei de conservação de massa é analisada. Este modelo tem as seguintes considerações,

- O movimento das partes móveis descreve um movimento sinusoidal;
- As temperaturas são conhecidas e constantes em todos os subsistemas do motor;
- A vedação entre as partes que compõem o motor é perfeita, devido a isso, não existe variação de massa do fluido de trabalho;
- O fluido de trabalho obedece perfeitamente às leis dos gases;
- A pressão instantânea é constante em qualquer ponto do fluido de trabalho.

Após essas considerações, o modelo descrito por Hirata (1997) para um motor Stirling tipo alfa possui as seguintes equações:

$$V_C = V_{SE} \frac{1 + \cos(\theta)}{2} + V_{SC} \frac{1 - \cos(\theta - \alpha)}{2} + V_{DC} \quad (1)$$

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

$$V = V_E + V_C + V_R \quad (3)$$

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

$$P = \frac{p_{mean} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \times \cos(\theta - a)} \quad (5)$$

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

$$v = V_{SC} / V_{SE} \quad (7)$$

$$a = (v \times \sin(\alpha)) / (t + \cos(\alpha) + 1) \quad (8)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t - 1)v \times \cos(\alpha) + (v)^2 - 2t + 1} \quad (9)$$

$$S = t + \frac{2t \times V_{DE}}{V_{SE}} + 2 \frac{V_{DC}}{V_{SE}} - 2 \frac{V_B}{V_{SE}} + 1 + v + \frac{4t \times V_R / V_{SE}}{1 + t} \quad (10)$$

$$c = B / S \quad (11)$$

$$W_i = p_{mean} \times V_{SE} \frac{\pi \times c(1-t)\sin(\alpha)}{1 + \sqrt{(1-c^2)}} \quad (12)$$

Onde W_i é o trabalho indicado, θ a posição angular do pistão de potência, α o ângulo de fase entre o curso dos pistões, p_{mean} a pressão média do ciclo, V_{SE} o volume deslocado pelo pistão deslocador, V_{SC} o volume deslocado pelo pistão de potência, V_{DC} o volume morto do espaço de compressão, V_{DE} o volume morto do espaço de expansão, V_C o volume instantâneo do espaço de compressão, V_E o volume instantâneo do espaço de expansão, V_R o volume espaço de regeneração, V o volume total instantâneo, T_C a temperatura no espaço de compressão e T_E a temperatura no espaço de expansão.

O modelo de Schmidt é muito utilizado para conseguir um ponto de início em modelos de segunda e terceira ordem, como exemplificado em Martini (1980).

1.2 Modelo de Beale

O modelo de Beale é classificado como um modelo semi-empírico. As simulações semi-empíricas são mais simples que as abordadas nos diversos modelos teóricos (modelos de primeira, segunda e terceira ordem). O número de Beale, por exemplo, se baseia na relação entre a equação de cálculo da potência de saída do motor, Eq. (13), e o gráfico apresentado na Fig. (1), o qual é obtido por meio de dados experimentais. O número de Beale é um número adimensional que relaciona a potência de saída do motor (P_o) com razões de pressão, temperatura e com o tamanho do motor, presentes no gráfico obtido experimentalmente (Aladayleh and Alahmer, 2015).

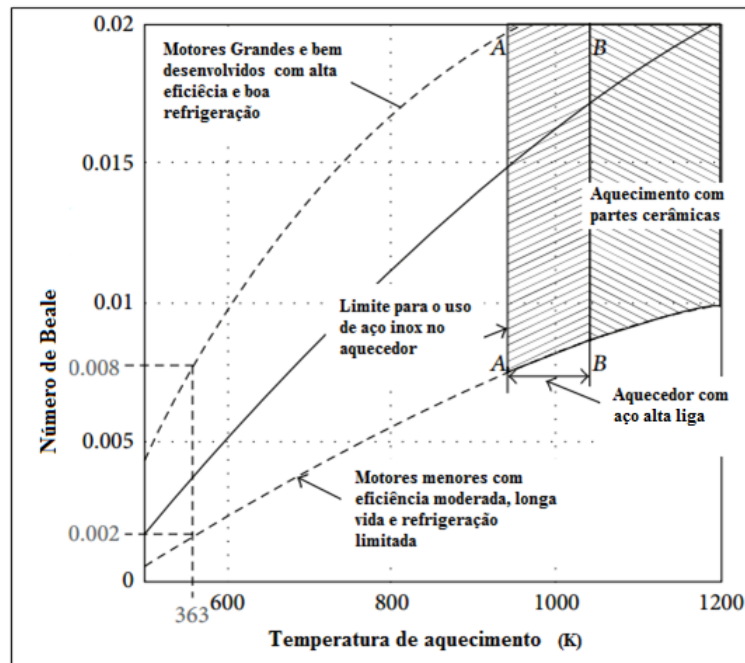


Figura 1: Gráfico base para o número de Beale por Aladayleh and Alahmer (2015).

$$P_o = B_n \times f \times P \times V_E \quad (13)$$

Onde B_n o número de Beale, f a frequência de operação, P a pressão média e V_E o volume de expansão.

O tempo computacional gasto no cálculo da potência de saída do motor usando o modelo de Beale é reduzido quando comparado com os outros modelos, por esse motivo, ele é muito usado quando se inicia os primeiros estudos sobre motor Stirling. Neste trabalho, ele será utilizado para comparar os resultados com modelos mais complexos.

1.3 Modelo de Iwamoto

O modelo de Iwamoto consiste em seis equações que relacionam as variáveis principais do ciclo do motor Stirling. Volume de expansão, pressão média, temperatura de expansão, e propriedades específicas do gás de trabalho são todos parâmetros de entrada para o cálculo.

Este modelo será bastante abordado neste trabalho pelo fato de apresentar o menor erro de cálculo nos resultados teóricos, assim como pela praticidade na modificação das equações que o compõem.

O primeiro passo para o cálculo do desempenho do motor por este método é o cálculo dos dois adimensionais P^* e T^* , obtidos a partir das Eq.(14) e (15) respectivamente. O segundo passo é a obtenção do adimensional S^* pela Eq. (16).

Por fim, a rotação final é obtida pelo adimensional n^* da Eq. (17), e a potência pelos adimensionais W^* e L^* na Eq. (21) e (19) respectivamente (Iwamoto *et al.*, 2001).

$$P^* = \frac{P_m}{P_{lim}} \quad (14)$$

$$T^* = \frac{T_E - T_C}{T_E + T_C} \quad (15)$$

$$S^* = \frac{T_{lim} \times R \times V_E^{2/3}}{v_{lim}^2} \quad (16)$$

$$n^* = 2,3 \times 10^{-04} \times S^{*0,56} \quad (17)$$

$$n^* = \frac{n \times V_{SE}^{2/3}}{v} \quad (18)$$

$$L^* = 0.15 \times n^{*1,06} \quad (19)$$

$$L^* = W_S^* \times n^* \quad (20)$$

$$W^* = \frac{W_S}{P_m \times V_E \times P^* \times T^*} \quad (21)$$

Então, por meio de regressões obtidas previamente por gráficos experimentais, o n^* e o L^* são obtidos no terceiro passo.

Onde P_{lim} é a pressão limite do equipamento, T_C é a temperatura na compressão, R é a constante dos gases, T_{lim} a temperatura de limite do equipamento, v_{lim} a viscosidade cinemática limite e n^* é a rotação do motor

Neste trabalho será apresentada uma variação nos adimensionais das Eq. (17) e (19), as quais estão relacionadas ao terceiro passo de cálculo dos parâmetros do motor Stirling. Busca-se a partir dessa proposta ver se existe uma redução de erro no resultado teórico final.

1.4 Algoritmo de Programação

Embora existam diversas plataformas de programação de modelos matemáticos para realizar simulações numéricas, este trabalho é programado no software LabVIEW da *National Instruments*. Esta plataforma permite o desenvolvimento de um painel frontal de fácil customização, que permite uma interação prática para a implementação das condições de entrada aos diversos modelos, assim como a leitura dos resultados. A programação em LabVIEW é descrita por Elliott *et al.* (2007) como um fluxo de dados onde o código não é escrito, mas sim desenhado ou esquematizado em um diagrama de blocos. Um programa desenvolvido no software LabVIEW é chamado de instrumento virtual VI (do inglês *Virtual Instrument*).

2. METODOLOGIA DO CÁLCULO DE DESEMPENHO

A metodologia proposta para o cálculo inicial de um motor Stirling pode ser feita de duas formas. Pode-se dimensionar o volume das câmaras à partir de uma potência desejada, ou pode-se obter uma potência à partir de um volume pré-determinado. A metodologia apresentada à seguir é diretamente ligada à segunda forma. Contudo, é possível obter resultados para a primeira análise por experimentações.

A Figura (2) apresenta um fluxograma com a metodologia proposta para a validação dos modelos descritos anteriormente. Para esta comparação será utilizado o motor Stirling NS03T. A escolha desse motor é devido a ele ser um dos protótipos com maior base de dados na literatura científica, sendo produzido entre 1982 e 1988 (Kagawa, 2000; Takizawa *et al.*, 2004).

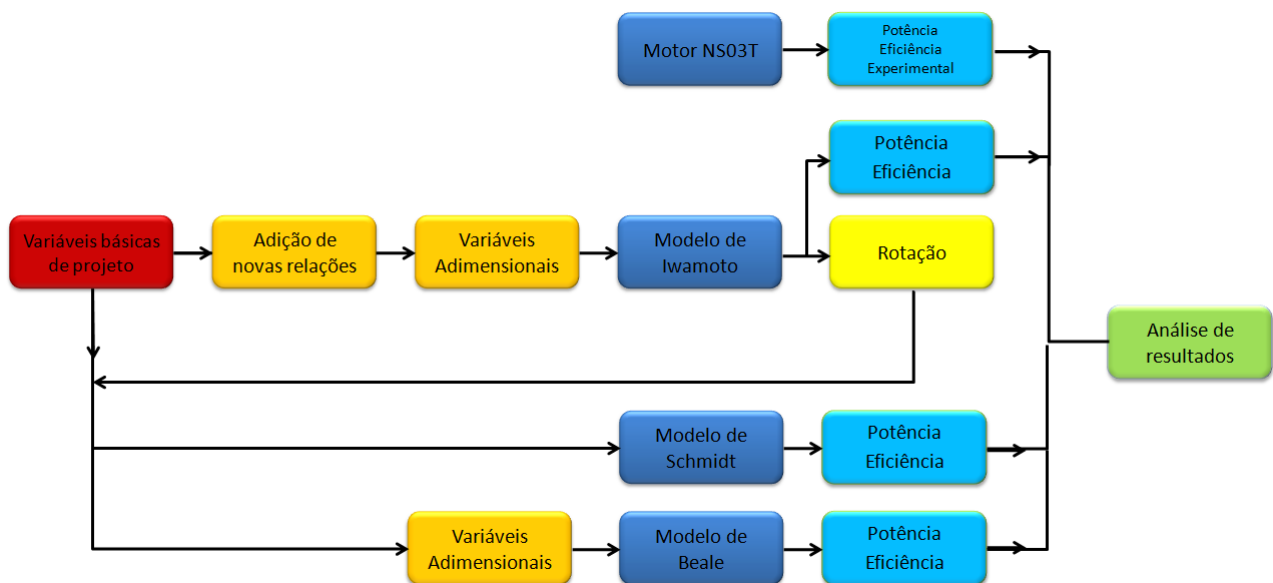


Figura 2: Diagrama de blocos apresentando os passos da metodologia aplicada.

2.1 Procedimentos Computacionais

Um dos maiores desafios ao se utilizar um modelo computacional para previsão de desempenho, é obter todas as variáveis de entrada que os modelos precisam para o seu correto funcionamento. Modelos como Schmidt e Beale necessitam como variável de entrada a rotação do motor (n), a qual é um parâmetro difícil de se estimar inicialmente. Já o modelo proposto por Iwamoto *et al.* (2001) oferece como parâmetro de saída a rotação do motor para a maior potência, por esse motivo ele é aprofundado neste trabalho.

As modificações propostas neste trabalho ao modelo de Iwamoto são as modificações das Eq. (17) e (19). Busca-se melhorar a resposta desse método. Assim, as duas novas relações são obtidas pela análise de novos dados de 26 motores mais recentes, sendo avaliados também motores do tipo gama. Esta modificação por se observar que a análise original do método desenvolvido por Iwamoto, contém dados de 18 motores Stirling, sendo só do tipo beta e alfa.

As equações para a formulação de uma nova relação semi-empírica são obtidas das variáveis de potência registradas em forma de gráfico. Esse gráfico contém os valores que permitem o cálculo de S^* , n^* e L^* obtidos do trabalho de Sripakagorn and Srikam (2011), sendo utilizados os motores numerados de 1 a 19 e de 23 a 26. Os outros motores, 20 a 22, são obtidos do trabalho de Bryan C Caetano (2017). A Tabela (1) contém a descrição dos dados para análise.

Tabela 1: Dados dos motores utilizados para as relações semi-empíricas.

	Motor/Propriedade	Potência(W)	Pm(bar)	Vse(cm ³)	n(rpm)	Te(K)	Tc(K)
1	Iwamoto	1,5E+02	1,0E+00	4,0E+04	1,5E+02	4,0E+02	3,1E+02
2	Kongtragool	1,7E+00	1,0E+00	8,9E+02	5,2E+01	4,4E+02	3,1E+02
3	Kongtragool	6,1E+00	1,0E+00	7,4E+03	2,0E+01	4,4E+02	3,1E+02
4	Kongtragool	1,2E+01	1,0E+00	8,9E+02	1,3E+02	5,9E+02	3,1E+02
5	Ishiki	9,1E+01	1,0E+00	1,8E+03	5,0E+02	6,4E+02	3,1E+02
6	Ecoboy (N2)	6,0E+01	8,0E+00	8,1E+01	1,2E+03	7,0E+02	3,2E+02
7	Ecoboy (He)	1,0E+02	9,0E+00	8,1E+01	1,1E+03	7,2E+02	3,1E+02
8	Ecoboy (N2)	7,1E+01	8,0E+00	8,1E+01	9,5E+02	7,4E+02	3,1E+02
9	Kongtragool	3,3E+01	1,0E+00	7,4E+03	4,2E+01	7,7E+02	3,1E+02
10	Angkee, 350 °C	2,7E+01	7,0E+00	1,7E+02	2,6E+02	6,2E+02	3,1E+02
11	Angkee, 500 °C	9,5E+01	7,0E+00	1,7E+02	3,6E+02	7,7E+02	3,1E+02
12	Basic 400 hp	2,9E+05	1,1E+02	1,7E+04	4,5E+02	9,7E+02	3,1E+02
13	NS-03M	3,8E+03	6,2E+01	1,6E+02	1,4E+03	9,7E+02	3,1E+02
14	MP1002CA	2,5E+02	1,5E+01	5,9E+01	1,5E+03	9,7E+02	3,1E+02
15	GPU-3	9,0E+03	6,9E+01	1,2E+02	3,6E+03	1,0E+03	3,1E+02
16	Batmaz	1,2E+02	2,0E+00	4,4E+02	1,2E+03	1,2E+03	3,2E+02
17	Cinar	1,3E+02	4,0E+00	2,8E+02	8,9E+02	1,3E+03	2,9E+02
18	Cinar	6,0E+00	1,0E+00	1,9E+02	2,1E+02	1,3E+03	3,0E+02
19	Karabulut	6,5E+01	2,5E+00	1,8E+02	5,6E+02	1,4E+03	2,9E+02
20	Caetano (20 mm)	1,2E-01	1,0E+00	1,1E+01	5,4E+02	8,7E+02	3,0E+02
21	Caetano (21 mm)	1,9E-01	1,0E+00	1,2E+01	6,0E+02	8,7E+02	3,0E+02
22	Caetano (22 mm)	2,4E-01	1,0E+00	1,4E+01	6,8E+02	8,7E+02	3,0E+02
23	Angkee Sripakagorn 7 bar	9,8E+01	7,0E+00	1,7E+02	4,0E+02	7,7E+02	3,0E+02
24	Angkee Sripakagorn 5 bar	7,7E+01	5,0E+00	1,7E+02	5,9E+02	7,7E+02	3,0E+02
25	Angkee Sripakagorn 4 bar	4,0E+01	3,0E+00	1,7E+02	6,0E+02	7,7E+02	3,0E+02
26	Angkee Sripakagorn 1 bar	1,0E+01	1,0E+00	1,7E+02	4,0E+02	7,7E+02	3,0E+02

Para a validação dos modelos, os dados de dois experimentos no motor NS03T da Toshiba (Kagawa, 2000) são utilizados. Este motor tem a geometria tipo alfa com potência máxima de 3,46 kW e um volume de expansão de 192 cm³, características muito próximas às de alguns motores apresentados na Tab. (1). A Tabela (2) apresenta os dados constantes em todas simulações, que são necessários para o desenvolvimento deste trabalho. A Tabela (3) apresenta os dados de cada simulação, que são aqui referenciadas como "experimento de maior potência" e "experimento de maior eficiência". As simulações para a validação dos modelos de Schmidt e o Número de Beale utilizam a rotação apresentada em cada experimento.

Tabela 2: Parâmetros do motor NS03T no desempenho de maior potência

Parâmetro	Valor
Tipo de motor	Alfa
Fluido de trabalho	Hélio
Temperatura de resfriamento	298 K
Volume expansão (cm ³)	192
Volume morto aquecimento (cm ³)	3,223
Volume compressão (cm ³)	173
Volume morto resfriamento (cm ³)	1,185
Volume do regenerador 150/200 (cm ³)	0,138
Constante dos gases (J/kgK)	287,3

Tabela 3: Valores do motor para cada experimento.

Parâmetro	Valores para maior potência de saída	Valor para maior eficiência
Temperatura de aquecimento	959 K	971 K
Potência máxima do motor	3,46 kW	3,00 kW
Rotação para potência máxima	1250 rpm	900 rpm
Número de Beale	0,0152	0,0211

A metodologia proposta neste trabalho utiliza o valor de rotação obtida pelo modelo de Iwamoto *et al.* (2001) como uma das entradas para o previsão usando o modelo de Schmidt e Beale. O valores de potência e eficiência de cada método são então comparados com o motor NS03T Toshiba Kagawa (2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Usando as equações Eq.(14) a Eq.(20), foram feitas as regressões necessárias para atualizar os dados fornecidos por Iwamoto *et al.* (2001). Foram feitos os gráficos S^* vs. n^* e n^* vs. L^* apresentados na Fig. 3 e Fig. 4 respectivamente.

Em seguida são apresentadas as relações de potência obtidas pelas regressões, nas Eq.(22) e (23)

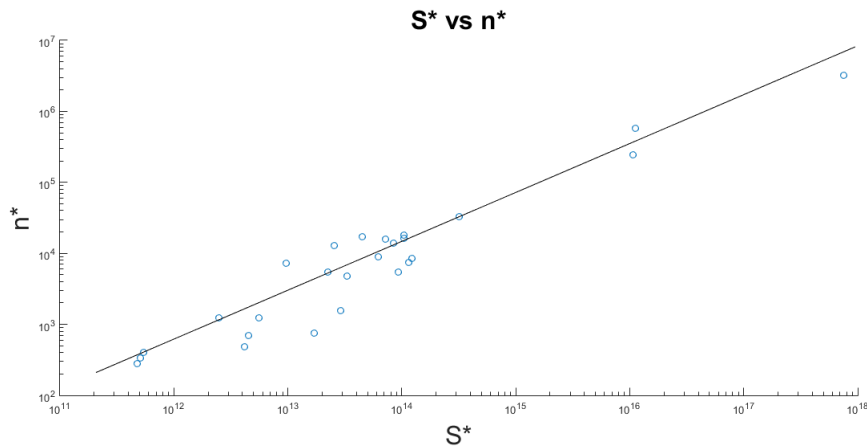


Figura 3: Relação n^* vs. S^*

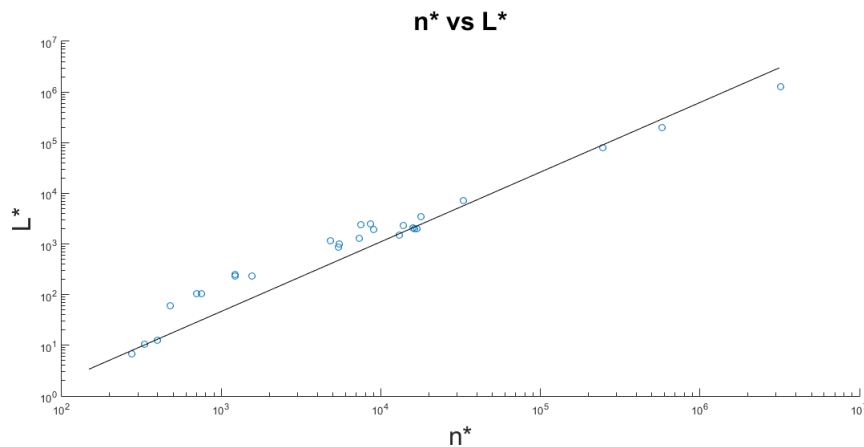


Figura 4: Relação L^* vs. n^*

As novas funções dos adimensionais n^* e L^* são apresentadas nas Eq. 22 e 23 respectivamente.

$$n^* = 3 \times 10^{-06} \times S^{*0,6855} \quad (22)$$

$$L^* = 0,0262 \times n^{*1,1982} \quad (23)$$

A interface do programa desenvolvido no LABVIEW tem o painel frontal apresentado na Fig. (5), com entradas dos parâmetros base do motor na esquerda e as saídas à direita. O painel é dividido em três abas e cada uma representa um método de previsão. Na Fig. (5) estas abas são apresentadas de esquerda a direita. A interfase da esquerda, apresenta o modelo de Schmidt, a do meio apresenta o modelo proposto neste trabalho e a mais a direita, o número de Beale. Apenas a previsão pelo modelo de Schmidt possui gráficos de saída, podendo ser apresentado o comportamento da pressão no interior do cilindro em função do volume deslocado, assim como o do volume instantâneo de cada câmara do motor em função do giro do motor.

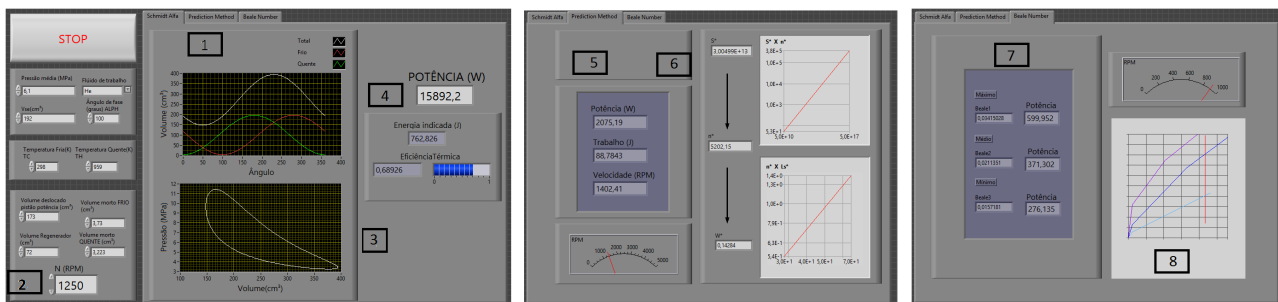


Figura 5: Apresentação da interface de usuário da ferramenta desenvolvida.

Os campos a serem preenchidos em cada uma das telas representam as variáveis de entrada e os valores obtidos de saída do software. Na Fig. (5) estão identificados a partir de números as diversas áreas, assim, o número (1) representa as abas para decisão de qual modelo utilizar, o (2) apresenta as variáveis de entrada aos modelos. Os números (3) e (4) representam respectivamente: os gráficos de volume vs. tempo (da câmara de aquecimento, resfriamento e o total) e o diagrama PV, a potência e eficiência de saída do modelo de Schmidt para o motor alfa. A potência de saída do modelo de Iwamoto é apresentada pelo algarismo identificado pelo número (5), e os gráficos semi-empíricos pelo (6). De forma análoga, o número (7) representa as potências de saída do modelo de Beale, e o (8) a localização no gráfico das temperaturas especificadas (o segmento de reta vermelha comportado entre as linhas roxa e azul clara).

A Tabela (4) apresenta os resultados das simulações realizadas usando os dados do motor NS03T no ponto de maior potência.

Tabela 4: Potência obtida em cada modelo com o erro em relação ao motor NS03T, para o ponto de operação de maior potência.

Parâmetro	Potência (W)	Erro (%)
NS03T	3460,0	-
Schmidt	21314,2	516
Beale	488,0	86
Iwamoto	5760,2	66,4
Lara <i>et al.</i> (2018)	2062,8	40

A Tabela (5) apresenta os resultados das simulações realizadas usando os dados do motor NS03T, para o ponto de maior eficiência.

Tabela 5: Potência obtida em cada modelo com o erro em relação ao motor NS03T, para o ponto de operação de maior eficiência

Parâmetro	Potência (W)	Erro (%)
NS03T	3000	-
Schmidt	16154,1	438
Beale	370	88
Iwamoto	5829,3	94,3
Lara <i>et al.</i> (2018)	2074,3	31

As Tabelas (6) e (7) apresentam as rotações encontradas pelos modelos de Iwamoto e Lara *et al.* (2018).

Tabela 6: Rotação obtida em cada modelo com o erro em relação ao motor NS03T, para o ponto de operação de maior potência

Modelo	Rotação (rpm)	Erro(%)
NS03T	1250	-
Iwamoto	2177,6	74,2
Lara <i>et al.</i> (2018)	1401,2	12,1

Tabela 7: Rotação obtida em cada modelo com o erro em relação ao motor NS03T, para o ponto de operação de maior eficiência

Modelo	Rotação (rpm)	Erro(%)
NS03T	900	-
Iwamoto	2187,3	143
Lara <i>et al.</i> (2018)	1402,3	55,78

Para os dados apresentados na Tab. (4), o resultado obtido pelo modelo proposto neste trabalho (Lara *et al.* (2018)) tem um erro de 40%. No entanto, o modelo de Schmidt é quem apresenta o maior erro. Esse resultado pode ser justificado por ser um modelo teórico simplificado, além de não ter na sua avaliação parâmetros descritos através de experimentação real. Para esse caso o modelo de Schmidt também apresenta uma eficiência alta, de 68,89%, enquanto a eficiência real é de 27,3%. Por outro lado, o modelo de Beale indica que a potência do motor Stirling varia de 369,4 W a 790,0 W, com uma potência provável de 488 W, valor que está subestimado se observado o valor real do motor NS03T. O modelo de Lara *et al.* (2018) prevê uma potência de 2061,8 W, a uma velocidade de 1401,2 *rpm*. Enquanto o de Iwamoto apresenta uma potência de 5760,3 W a uma rotação de 2177,6 *rpm*.

Para os dados apresentado na Tab. (5) que identificam o ponto de maior eficiência do NS03T, se observa que o resultado calculado a partir do modelo proposto neste trabalho é igual a 31%, quando se comparando a potência real e a simulada, ainda assim, o erro é menor que os 40% obtidos no experimento de maior potência. Os outros modelos apresentam os seguintes resultados: O modelos de Schmidt novamente apresenta uma potência superestimada, o modelo de Beale uma diferença de 88%, apresentando uma variação na saída de 275 W a 599 W. Por último, o modelo original de Iwamoto que novamente apresenta um resultado mais longe do real, com um erro de 98%.

Pode-se perceber que os erros menores são a partir da solução pelo método Lara *et al.* (2018), em especial para o experimento de maior eficiência. Embora a diferença no cálculo da potência seja menor, o modelo de também calcula a velocidade para a potência encontrada. Esta velocidade determinada possui erros menores para a potência final, e as velocidades estimadas tiveram um erro mínimo de 12%, no caso do experimento no ponto de maior potência, enquanto a atualização do modelo proposto neste trabalho estimou 1401,3 *rpm* para o ponto de maior potência, e 1402,3 *rpm* para o ponto maior eficiência, com um erro de 12,1% e 55% respectivamente.

Para ambos os casos no modelo de Iwamoto *et al.* (2001), a potência simulada por esse modelo aumentou. Para o experimento de maior eficiência este incremento deve exatamente porque o modelo não tem como dado de entrada a velocidade, se tornando ineficiente para analisar o comportamento do motor ao variar esta grandeza, sendo apenas um guia para a obtenção de uma potência máxima.

4. CONCLUSÃO

A metodologia apresentada neste trabalho mostra ser uma ferramenta bastante útil para pesquisas que visam entender o funcionamento básico de um motor Stirling, assim como permite fazer previsões de desempenho implementado modelos de baixo custo computacional. A quantidade de variáveis de entrada utilizada em cada um dos modelos torna possível um dimensionamento do motor Stirling, sendo útil tanto para pesquisas acadêmicas quanto para para indústrias.

Os métodos de previsão de desempenho apresentados mostram uma variação considerável em comparação com os valores experimentais. Os métodos semi-empíricos, os quais são os mais atuais, são os que apresentam a melhor acurácia, sendo que a previsão pelo modelo de Lara *et al.* (2018) a que mais se aproxima da realidade. Além disso, o modelo se diferencia dos demais por ter como variável de saída a velocidade para determinada potência, o que auxilia o dimensionamento de um motor Stirling.

O modelo proposto neste trabalho, Lara *et al.* (2018), apresenta um erro na rotação quando comparado ao modelo Iwamoto original consideravelmente menor, o que é ideal já que o dimensionamento com os outros modelos utiliza a rotação como variável de entrada. Contudo, ainda existe a necessidade de melhorar a exatidão, o que pode ser feito pelo ao analisar uma regressão feita a partir de motores que se assemelham ao motor pesquisado, o que reduzirá a divergência dos dados.

5. REFERÊNCIAS

- Aladayleh, W. and Alahmer, A., 2015. "Recovery of exhaust waste heat for ice using the beta type stirling engine". *Journal of Energy*, Vol. 2015.
- Bryan C Caetano, Isadora F Lara, O.R.S.R.R.M.V.G.F.d.G., 2017. "Portrayal of displacer and temperature in beta-type stirling engine". *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*.
- Deng, J., Wang, H.B., Wang, C.M. and Zhang, G.W., 2017. "A novel power market clearing model based on the equilibrium principle in microeconomics". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, pp. 1021–1027.
- Dincer, I., 2000. "Renewable energy and sustainable development: a crucial review". *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 4, No. 2, pp. 157–175.
- Elliott, C., Vijayakumar, V., Zink, W. and Hansen, R., 2007. "National instruments labview: a programming environment for laboratory automation and measurement". *JALA: Journal of the Association for Laboratory Automation*, Vol. 12, No. 1, pp. 17–24.
- Hirata, K., 1997. "Schmidt theory for stirling engines". *Stirling Engine home page*. Disponível em.
- Hussain, A., Arif, S.M. and Aslam, M., 2017. "Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 71, pp. 12–28.
- Iwamoto, S., Hirata, K. and Toda, F., 2001. "Performance of stirling engines". *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, Vol. 44, No. 1, pp. 140–147.
- Kagawa, N., 2000. "An experimental study of a 3-kw stirling engine". In *Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000.(IECEC) 35th Intersociety*. IEEE, Vol. 1, pp. 92–100.

- Macedo, W.N., Monteiro, L.G., Corgozinho, I.M., Macêdo, E.N., Rendeiro, G., Braga, W. and Bacha, L., 2016. "Biomass based microturbine system for electricity generation for isolated communities in amazon region". *Renewable Energy*, Vol. 91, pp. 323–333.
- Malroy, E.T., 1998. *Solution of the ideal adiabatic Stirling model with coupled first order differential equations by the Pasic method*. Ph.D. thesis, Ohio University.
- Martini, W.R., 1978. *Stirling engine design manual*. US Department of Energy, Office of Conservation and Solar Applications, Division of Transportation Energy Conservation.
- Martini, W., 1980. *Stirling engine design manual*.
- Onovwiona, H. and Ugursal, V.I., 2006. "Residential cogeneration systems: review of the current technology". *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 10, No. 5, pp. 389–431.
- Pilavachi, P., 2002. "Mini-and micro-gas turbines for combined heat and power". *Applied thermal engineering*, Vol. 22, No. 18, pp. 2003–2014.
- Sadeghierad, M., Darabi, A., Lesani, H. and Monsef, H., 2010. "Optimal design of the generator of microturbine using genetic algorithm and pso". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, No. 7, pp. 804–808.
- Scollo, L., Valdez, P. and Barón, J., 2008. "Design and construction of a stirling engine prototype". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 13, pp. 3506–3510.
- Sripakagorn, A. and Srikam, C., 2011. "Design and performance of a moderate temperature difference stirling engine". *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 6, pp. 1728–1733.
- Takizawa, H., Kagawa, N., Matsuguchi, A. and Tsuruno, S., 2004. "Performance of new matrix for stirling engine regenerator". In *Energy Conversion Engineering Conference, 2002. IECEC'02. 2002 37th Intersociety*. IEEE, pp. 491–496.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

METHODOLOGY FOR PREDICTING PERFORMANCE PARAMETERS OF STIRLING ENGINES

Isadora .F. Lara, isadoraflara@gmail.com.br¹
 Bryan C. Caetano, bcastrocaetano@gmail.com²
 Oscar R. Sandoval, osc.sandoval@hotmail.com²
 Ramon M. Valle, ramon@demec.ufmg.br²

¹Colegiado de Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil

Resumo: Energy distribution regulation for large production centers now allows design and construction of decentralized power generation plants, especially convenient for urban centers away from large cities. Stirling engines have been used again for its capability to work using many external thermal energy sources, such as numerous renewable energy sources. For this reason, there is a need to use theoretical models for predicting power in Stirling engines, diminishing designing and developing costs. In this work, a methodology is developed to understand the first stages of sizing a Stirling engine. The models discussed here allow, from the use of design data, an estimate of engine performance. Three predictive models are implemented in a program developed in the LABVIEW platform. First-order models and semi-empirical models are evaluated. The models analyzed are the Schmidt model, the Beale number, and the semi-empirical model proposed by Iwamoto. Finally, through the analysis of several references available in literature, a change in the Iwamoto model is presented and compared with experimental results of a Stirling motor of the literature.

Keywords: Performance prediction, Stirling cycle, Theoretical modeling.