

INVESTIGAÇÃO DE MOTORES DE STIRLING OPERANDO COM AR ATMOSFÉRICO E HÉLIO EM DIFERENTES PRESSÕES

Mauricio Klein Gussoli, mauriciogussoli@gmail.com¹
Júlio César Dainezi de Oliveira, jcdoliveira@uem.br¹

¹Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Bloco 14, Av. Colombo, 5790 - Zona 7, Maringá - PR, 87020-900.

Resumo. O interesse por sistemas alternativos de energia tem estimulado pesquisas sobre motores Stirling na área acadêmica. Dada sua alta flexibilidade no uso de diferentes combustíveis, que podem ser uma máquina de combustão externa, a previsão da potência desses motores é importante. Embora muitos modelos matemáticos estejam disponíveis na literatura, a pesquisa sobre fluidos de trabalho ainda é importante. Este artigo tem como objetivo investigar o comportamento dos motores Stirling com base na potência específica em função da pressão média de operação do hélio e do ar atmosférico. Para isso, os dados das variáveis dos motores Stirling foram obtidos de publicações científicas e, por meio de um software auxiliar, foram levantados os gráficos de potência específica máxima para diferentes condições de operação. As potências máximas também foram investigadas em função dos volumes de expansão varridos. Assim, foi possível caracterizar a potência específica máxima para o hélio e o ar atmosférico. O hélio foi encontrado para retornar uma potência específica quatro vezes maior do que o ar atmosférico em termos médios. Uma limitação do ar atmosférico foi encontrada em termos de pressão média de operação. Finalmente, uma lacuna foi encontrada na discussão das configurações do motor Stirling e no agrupamento de máquinas.

Palavras chave: Motor de Stirling. Fluido de trabalho. Energias renováveis. Engauge Digitizer. Potência específica.

Abstract. The interest in alternative energy systems has been stimulating research on Stirling engines in the academic area. Given its high flexibility in the use of different fuels, which can be an external combustion machine, the power prediction of these engines is important. Although many mathematical models are available in the literature, research on working fluids is still important. This article aims to investigate the behavior of Stirling engines based on the specific power as a function of the mean operating pressure for helium and atmospheric air. For that, the data of variables of the Stirling engines were obtained from scientific publications and, by means of auxiliary software, the graphics of maximum specific power were raised for different operating conditions. The maximum powers were also investigated as a function of the swept volumes of expansion. Thus, it was possible to characterize the maximum specific power for helium and atmospheric air. Helium was found to return a specific power four times greater than atmospheric air in average terms. An atmospheric air limitation was found in terms of average operating pressure. Finally, a gap was found in the discussion of Stirling engine configurations and in the grouping of machines.

Keywords: Stirling engine. Working fluid. Renewable energies. Engauge digitizer. Specific power.

1. INTRODUÇÃO

O motor de Stirling surge no século XIX, ano de 1816, com o registro da patente feita pelo reverendo Robert Stirling e James Stirling. Os motores de Stirling também são chamados de motores a ar quente, dado que os primeiros motores operavam com ar atmosférico e seu funcionamento reside na diferença de temperatura do fluido de trabalho (Erol *et al.*, 2017). Assim, houve uma alternativa às máquinas a vapor, utilizadas no bombeamento de água e no acionamento de geradores elétricos, que em face das altas pressões e temperaturas de operação culminavam em acidentes (Dincer, 2018).

Com o advento das máquinas elétricas e do aprimoramento dos motores a combustão interna (tanto ciclo Otto quanto Diesel), os motores de Stirling perderam seu espaço temporariamente. Segundo Dincer (2018), em meados da década de 1930, a pesquisa de motores de Stirling para alimentação de baterias para rádios portáteis pela Phillips reacendeu o interesse, além de interesses em aplicações militares e em propulsões marítimas até a metade década de 1970.

Em face da crise energética de 1970, a busca por sistemas alternativos e a demanda por padrões de qualidade de máquinas já existentes cresceu, além da criação de órgãos governamentais responsáveis pela pesquisa e desenvolvimento na área de energias renováveis (Sorensen, 1991; Sissine, 2014). Esse cenário estimulou a área acadêmica a pesquisar sobre motores de Stirling, em relação a modelos matemáticos e também testes experimentais.

Com a finalidade de quantificar tal interesse, em uma busca nas bases de dados da Scopus e do Google Acadêmico a partir das palavras-chaves “*Stirling engine*”, observa-se o crescimento do interesse dessas máquinas refletidas nos números de publicações – Fig. 1 – dos anos 1816 até 2020.

Desde o registro da patente em 1816 até meados de 1960, observa-se praticamente somente registro de patentes no Google Acadêmico, sem artigos publicados ainda na Scopus. As patentes eram relacionadas principalmente a mecanismos de transmissão de movimento e variação de volumes de trabalho, configurações de motores e combinação com outros sistemas de geração de potência.

A partir de 1970, houve um aumento de relatórios e de trabalhos envolvendo os motores a ar quente. Posteriormente, a partir dos anos 2000, o número de trabalhos sobre o tema vem crescendo paulatinamente ano a ano, com foco em modelos matemáticos para previsão de desempenho e otimização de motores. Diversos trabalhos vêm tratando sobre predição de desempenho e verificação de modelos com testes experimentais (Jan e Marek, 2016; Yang e Cheng, 2017; Bataineh, 2018).

Dada a flexibilidade dos motores de Stirling quanto à utilização da fonte quente, podendo ser uma máquina de combustão externa, esses motores podem utilizar as fontes de calor como a combustão de biogases e de biomassas e combustão convencional de combustíveis fósseis. Também podendo ser também uma máquina de aproveitamento de energia residual sem haver a combustão propriamente dita, pode-se utilizar como fontes de calor os raios solares, o aquecimento via resistências elétricas e o aproveitamento de energias residuais. Todas essas fontes vêm sendo discutidas na literatura (Thombare e Verma, 2008; Damirchi *et al.*, 2016; Smith *et al.*, 2016).

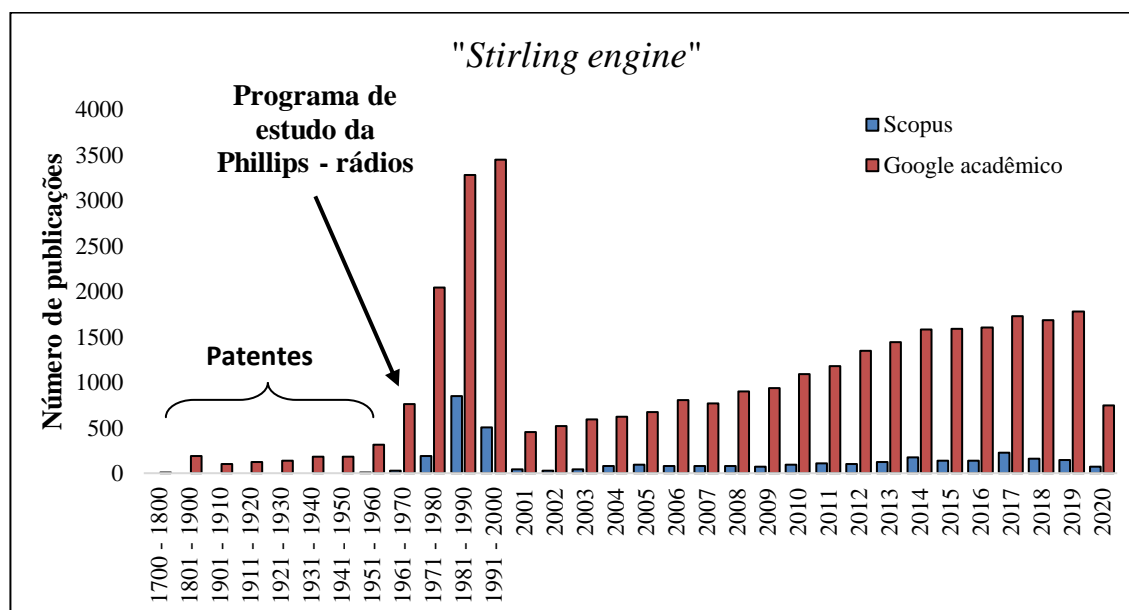


Figura 1. Interesse em motores de Stirling com base no número de publicações. Fonte: Autor (2020)

Os motores de Stirling são motores alternativos cujo ciclo termodinâmico é regenerativo e fechado, isto é, o fluido de trabalho se desloca entre as partes da máquina, com uma extremidade quente e outra fria, sem abertura ao ambiente externo.

O ciclo termodinâmico ideal consiste em duas isotermas e em duas isocóricas, mostrado na Fig. 2. Os processos isotérmicos ocorrem nas câmaras de compressão (1-2) e de expansão (3-4) que estão em contato com as fontes fria e quente, respectivamente. Os processos isocóricos (2-3 e 4-1) ocorrem através do regenerador, no deslocamento do fluido de trabalho entre essas câmaras. (Thombare e Verma, 2008; Hachem *et al.*, 2018).

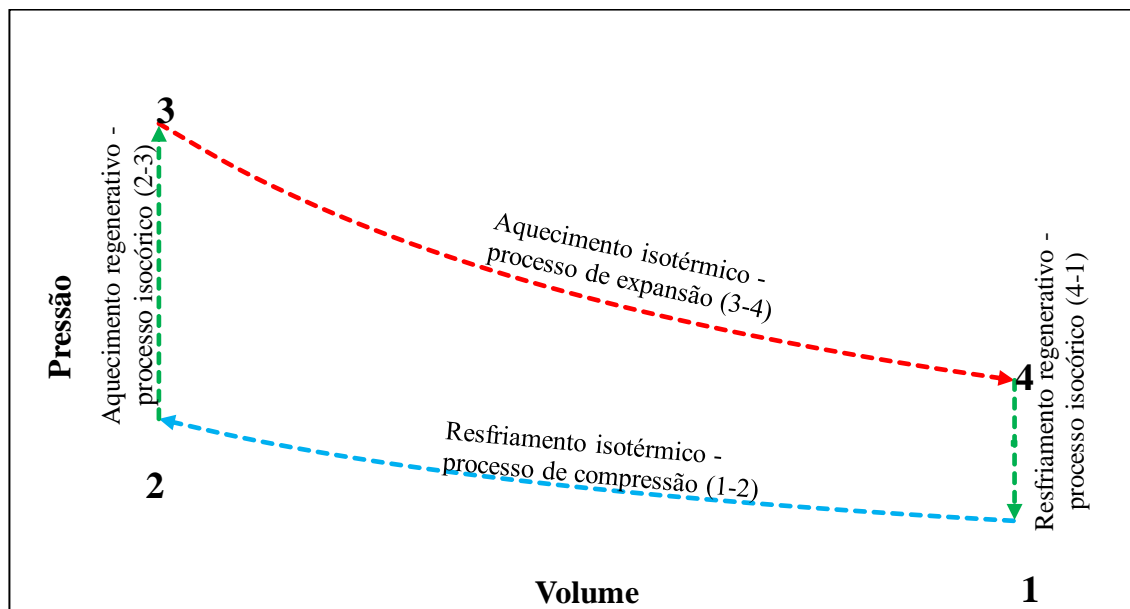


Figura 2 - Ciclo de Stirling ideal. Fonte: Autor (2020)

Os principais componentes de um motor de Stirling são as câmaras de expansão e compressão em conjunto com as fontes quente e fria, os pistões de expansão e compressão, o regenerador e o mecanismo de transmissão de movimento.

Historicamente divide-se os motores de Stirling em três configurações: α , β , γ . Essa classificação se refere ao arranjo das câmaras de compressão e expansão (Wang *et al.*, 2016). Segundo Egas e Clucas (2018) os motores de configuração α possuem suas câmaras ligadas em série geralmente com o regenerador; o β possui as câmaras alinhadas coaxialmente com a possível sobreposição dos volumes de compressão e de expansão; o γ é uma variação do β com as câmaras de expansão e de compressão separadas. Ao contrário do motor α que possui dois pistões – um de compressão e outro de expansão – os motores β e γ possuem um pistão de compressão e um deslocador. A função desse é deslocar o fluido de trabalho entre as câmaras, além de participar do processo de expansão e geração de trabalho propriamente dita.

O regenerador atua como um dos principais elementos de troca térmica nos motores de Stirling. O regenerador constitui uma matriz metálica, podendo ser porosa ou aletada, cuja função é atuar como uma esponja térmica. Isto é, no deslocamento do fluido de trabalho da câmara de compressão para expansão, o regenerador fornece calor ao fluido de trabalho e no processo inverso, há absorção de calor do fluido de trabalho pela matriz metálica (Thombare e Verma, 2008; Gheith *et al.*, 2012a).

De acordo com Erol, Yaman e Dogan (2017), o mecanismo de transmissão de movimento está geralmente vinculado à configuração do motor. Para motores α e γ utilizam-se geralmente variações do mecanismo biela-manivela, até mesmo inovações como o mecanismo de garfo escocês – *scotch yoke* – e de prato oscilante – *swashplate* (Campos *et al.*, 2012; Altin *et al.*, 2018). Já os β , o mecanismo rômbo é o mais utilizado, uma vez que há uma diminuição dos esforços laterais por conta da geometria coaxial dos motores β e também pela sua simplicidade de manufatura (Yunus *et al.*, 2016; Aksoy *et al.*, 2017).

Diversos trabalhos vêm discutindo diferentes cenários de operação nos motores de Stirling relativos às condições de pressão e temperatura, a fim de obter as potências de saída para cada condição de operação (Gheith *et al.*, 2012b; Cheng *et al.*, 2013; Bert *et al.*, 2014; Aksoy *et al.*, 2017). É esperado que o aumento da pressão implique em maiores potências de saída dos motores de Stirling, visto que maiores pressões retornem maiores massas específicas de fluido de trabalho. Assim, há uma maior quantidade de fluido de trabalho, tanto para trocar calor com as fontes, quanto para realizar trabalho.

Os principais fluidos de trabalho dispostos na literatura são o ar atmosférico, o hélio, o hidrogênio e outros não tão comuns como o dióxido de carbono, o nitrogênio e os fluidos orgânicos (Bahrami *et al.*, 2013; Ni *et al.*, 2016; El-Ghafour *et al.*, 2019). Os fluidos de trabalho para os motores de Stirling devem possuir altas condutividade térmica e calor específico e baixas viscosidade e massa específica (Thombare e Verma, 2008). No entanto, gases como o hélio e o hidrogênio, além de possuírem tais qualidades, são altamente compressíveis. Tal característica demanda condições de operação personalizadas, como maiores pressões médias de operação (Sala e Invernizzi, 2014). Para o caso específico do hidrogênio, apesar de um alto desempenho nos motores de Stirling, há um fator de segurança importante que na ocorrência de vazamentos pode ocorrer acidentes, visto que é altamente inflamável, energeticamente denso e desempenha sua função próximo a fonte de calor em alta temperatura (Musmar e Tlili, 2015; Chahartaghi e Sheykhi, 2018).

Apesar dos esforços de diversos autores na predição de desempenho, via modelos matemáticos, como observado nos trabalhos de revisão recentes publicados por Thombare e Verma (2008), Chen, Goswami e Stefanakos (2014), Wang *et al.* (2016), Ahmadi *et al.* (2017) e Hachem *et al.* (2018), há poucos trabalhos relatando a predição de desempenho focada

nos fluidos de trabalho. Pontualmente, no que tange o conhecimento dos autores desse artigo, dois estudos utilizaram simulações para prever o desempenho de motores de Stirling. Musmar e Tlili (2015) propuseram a investigação numérica da potência de saída de motores de Stirling em função de diferentes temperaturas de fonte quente e fria para o hidrogênio, o hélio e o ar atmosférico. Katooli, Askari e Hooshang (2020) utilizaram um código computacional para prever o trabalho útil de saída em diferentes rotações e pressões médias de operação para o hélio, o nitrogênio e o hidrogênio.

Relativo aos modelos matemáticos, além do modelo ideal com processos bem definidos, há dois que são mais discutidos e bem estabelecidos na literatura: o modelo isotérmico e o adiabático. O modelo isotérmico vem historicamente em primeiro lugar, visto que sua complexidade computacional é menor, além de possuir solução analítica para o modelo de variação volumétrica senoidal. Os processos de expansão e compressão são isotérmicos, similar ao modelo ideal (Ahmadi *et al.*, 2017). Já para o modelo adiabático, a complexidade cresce por conta das temperaturas de câmaras de expansão e compressão não serem constantes, cuja implicação se dá pelos processos de expansão e compressão adiabáticos. Também, nesse modelo, surgem um conjunto de equações diferenciais, cuja solução depende de rotinas computacionais como a de Runge-Kutta, por exemplo (Santos *et al.*, 2015; Ahmadi *et al.*, 2017).

Portanto, apesar de haver diversos artigos de simulações e verificações experimentais de modelos na literatura, para diferentes fluidos de trabalho ainda há a dúvida se é possível prever a potência específica com base na operação com um determinado fluido de trabalho.

A importância neste tipo de discussão reside em duas aplicações práticas: 1) caso não se tenha a informação de qual fluido de trabalho um motor opera, com base em medições básicas é possível obter a informação e 2) contribuir na área de classificação de motores de Stirling, que apesar de haver diversas classificações, a discussão se mostra incipiente. Há diversas classificações desses motores que ainda estão se estruturando como a classificação de tamanho de máquina, classificação com base na faixa de temperatura e classificação com base na pressão média de operação, por exemplo.

O objetivo deste artigo é investigar o comportamento dos motores de Stirling com base na potência específica em função da pressão média de operação para o hélio e o ar atmosférico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A potência específica é utilizada em outras áreas do conhecimento de máquinas térmicas, como os motores de combustão interna (MCI). Segundo Brunetti (2012) a potência específica consiste na razão entre a potência [W] pelo volume [cm³]. Neste artigo emprestou-se o conceito de potência específica (P_{esp}) com base na potência de saída dos motores de Stirling, P_e [W], dividida pelo volume varrido de expansão V_{se} [cm³] – Eq. (1).

$$P_{esp} = \frac{P_e}{V_{se}} \quad (1)$$

A obtenção de dados da literatura foi realizada com o auxílio de *softwares* como o Engauge Digitizer 12.1 e planilhas eletrônicas para o registro de informações. O Engauge Digitizer 12.1 é um *software open-source* que possibilita a obtenção de dados e informações de gráficos em artigos, com os dados de saída em formato .csv.

As faixas limítrofes de operação em relação às variáveis, fluidos de trabalho e volumes são dados pela Tab. 1.

Tabela 1. Escopo de trabalho das variáveis de operação

Variável	Faixa de operação
Volume varrido de expansão V_{se} [cm ³]	7 - 850
Fluido de trabalho	Ar atmosférico e hélio
Pressão média de operação p_m [bar]	1 - 10

Para o gás hélio, foram obtidos dados de 9 motores. Para o ar atmosférico, registrou-se 11 motores. Quanto a pressão limitou-se a faixa de pressão para ambos fluidos de trabalho até 10bar.

Obteve-se a potência específica máxima para diferentes pressões médias de operação e fluidos de trabalho. Assim, o gráfico de potência específica máxima *versus* pressão média de operação ($P_{esp,max} \times p_m$) foi obtida para cada condição de operação. Os motores que tiveram operação em apenas até duas pressões não evidenciam comportamentos adequadamente, porém são úteis para visualizar qual o desempenho, em termos de potência, pressão e volume, que os pesquisadores tiveram em seus motores nas faixas dadas pela Tab. 1.

A fim de também identificar qual é o volume varrido de expansão que os motores estão sendo construídos, obteve-se os gráficos de potência *versus* volume varrido de expansão ($P \times V_{se}$) para várias pressões médias de operação. O agrupamento referente as pressões foi a seguinte: motores até 1 bar, motores entre 1bar e 2bar, entre 2bar e 3bar, e assim por diante.

O agrupamento dos motores em configurações α, β, γ para cada fluido de trabalho é dado pela Tab. 2.

Tabela 2. Número de motores em função da configuração para o ar atmosférico e o hélio

Fluido de trabalho	α	β	γ
Ar atmosférico	5	1	5
Hélio	3	5	1

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comportamento dos motores pode ser explicado com o auxílio da lei dos gases ideais – Eq. (2) – onde a p_m é a pressão média de operação [Pa], V é o volume [m³], m_{gas} é a massa de fluido de trabalho [kg], R é a constante universal dos gases [J/(kgK)] e T é a temperatura [K].

$$p_m V = m_{gas} RT \quad (2)$$

Utilizando essa equação apenas como referência, observa-se que, em um instante de tempo fixado durante o funcionamento do motor, o volume, a constante universal dos gases e a temperatura são fixas.

Assim, a relação entre a pressão e a massa de fluido de trabalho são diretamente proporcionais. Sem consideração de perdas termomecânicas e que envolvem o funcionamento dos motores, espera-se que de maneira generalista com o aumento de pressão, a massa de fluido de trabalho aumente. Assim, há uma maior quantidade de fluido disponível para realizar trocas térmicas e gerar trabalho propriamente dito, como discutido nos trabalhos de Gheith *et al.* (2012b) e Aksoy *et al.* (2017). Além da questão da massa, Abuelyamen *et al.* (2017) discutiram que o aumento de pressão média de operação tende a aumentar as trocas de calor por conta da introdução de turbulência do fluido de trabalho durante a operação da máquina.

Também se observa que as potências específicas máximas registradas do hélio possuem os limites máximo e mínimo de 4W/cm³ e 0,20W/cm³, respectivamente. Para o ar, por outro lado, os limites máximo e mínimo 0,94W/cm³ e 0,00002W/cm³.

As potências específicas para o hélio e para o ar atmosférico são dadas pelas Fig. 3e Fig. 4. Cada curva representa a potência específica máxima em uma pressão média de operação. Dos 9 motores que operaram com hélio, 6 motores possuíram variação da pressão média de operação e o restante tiveram operações em apenas uma pressão.

Dos 11 motores que operaram com ar atmosféricos, 5 motores possuíram pelo menos 3 pressões registradas, 2 motores apenas com 2 pressões registradas e o restante com operação em apenas 1 pressão. Observa-se que para o hélio e para o ar atmosférico ocorre uma tendência similar, isto é, o aumento de potência específica máxima com o aumento da pressão média de operação.

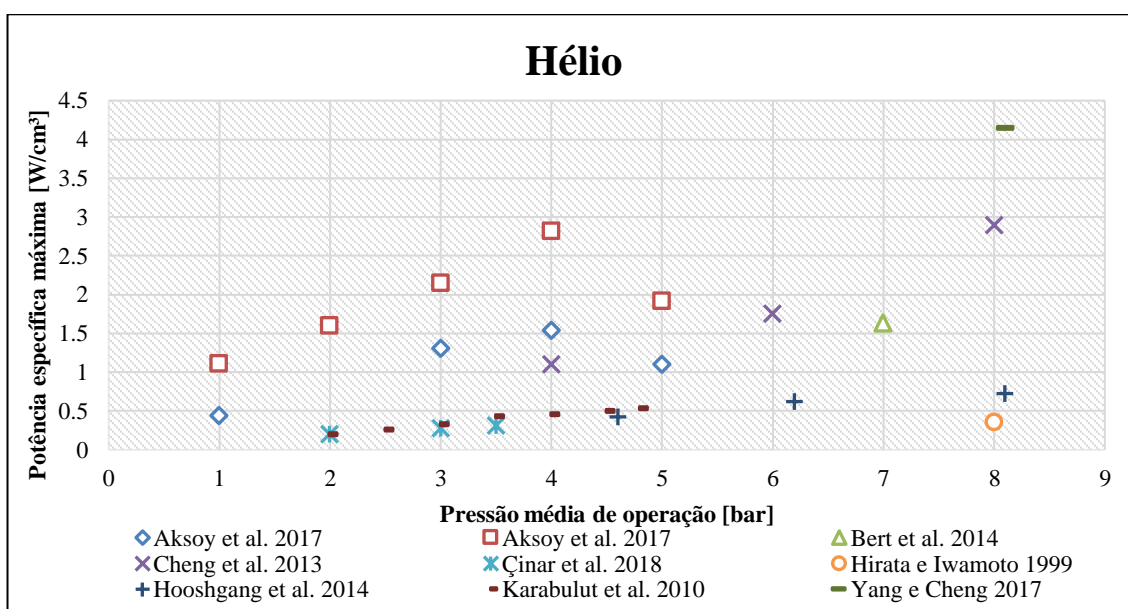


Figura 3. Potência específica máxima em função da pressão média de operação para o hélio

Em termos médios, o hélio apresenta mais que o quatro vezes a potência específica do ar, considerando a potência específica máxima de $2,1\text{W/cm}^3$ e de $0,47\text{W/cm}^3$ para o hélio e ar respectivamente. Tal comportamento em se tratando apenas de fluido de trabalho são explicados pelas propriedades térmicas dos gases.

Dessa maneira, é possível afirmar que, para o grupo de motores estudados, se houver uma potência específica alta (acima de $2,1\text{W/cm}^3$), há grandes chances de o motor utilizar hélio. Para potências específicas baixas (até $0,47\text{W/cm}^3$), a utilização é o ar atmosférico como fluido de trabalho.

Enquanto os motores que operam com hélio mostram operações mais uniformes – operam em mais níveis pressões e possuem aumento de potência específica gradativo sem um ponto de máximo – ao longo da variação da pressão, os que operam com ar atmosférico se mostram concentrados em operações até 4bar. Tal condição de operação pode ser atribuída por conta de o ar atmosférico ter maior massa molecular que o hélio e, portanto, menor compressibilidade. De acordo com Van Wylen, Sonntag e Claus (2006, p. 541), a massa molar do ar atmosférico é $28,97\text{ g/mol}$, enquanto a do hélio é $4,003\text{g/mol}$. A título de exercício para verificar a hipótese de maior massa molecular, para um motor hipotético que opere a 2bar ($2 \times 10^5\text{Pa}$) e temperatura de fonte quente de 500K e com constantes de gases R_{ar} de 287 J/(kgK) e R_{He} de $2077,5\text{J/(kgK)}$, a densidade será de: ρ_{ar} de $1,393\text{kg/m}^3$ e ρ_{He} de $0,1925\text{kg/m}^3$. Isso mostra que o ar atmosférico possui uma densidade de massa 7,24 vezes maior que do hélio. Assim, há menor espaço para aumento de pressão para o ar do que para o hélio visto que o volume disponível é fixo.

Apesar de maior massa poder representar maior potencial para geração de trabalho, os coeficientes de condutividade térmica influenciam nas trocas de calor. O ar atmosférico possui uma faixa de trabalho relativa à pressão média de operação mais baixa que o hélio são os diferentes coeficientes de condução térmica e difusividade térmica. O hélio possui coeficientes de condutividade e de difusividade térmicas ($k_{\text{hélio}}=0,7560\text{W/(m.K)}$, $\alpha_{\text{hélio}}=1,50\text{m}^2/(10^3\text{s})$) maiores que do ar ($k_{\text{ar}}=0,0262\text{W/(m.K)}$, $\alpha_{\text{ar}}=0,03\text{m}^2/(10^3\text{s})$); as propriedades são dadas por Thombare e Karmare (2012) e são referenciadas a 300K. Estas são propriedades indicam que o hélio possui mais facilidade como um meio de troca de calor, tanto na quantidade de calor indicada pela condutividade térmica, quanto pela velocidade que tal troca térmica ocorre dada pela difusividade térmica.

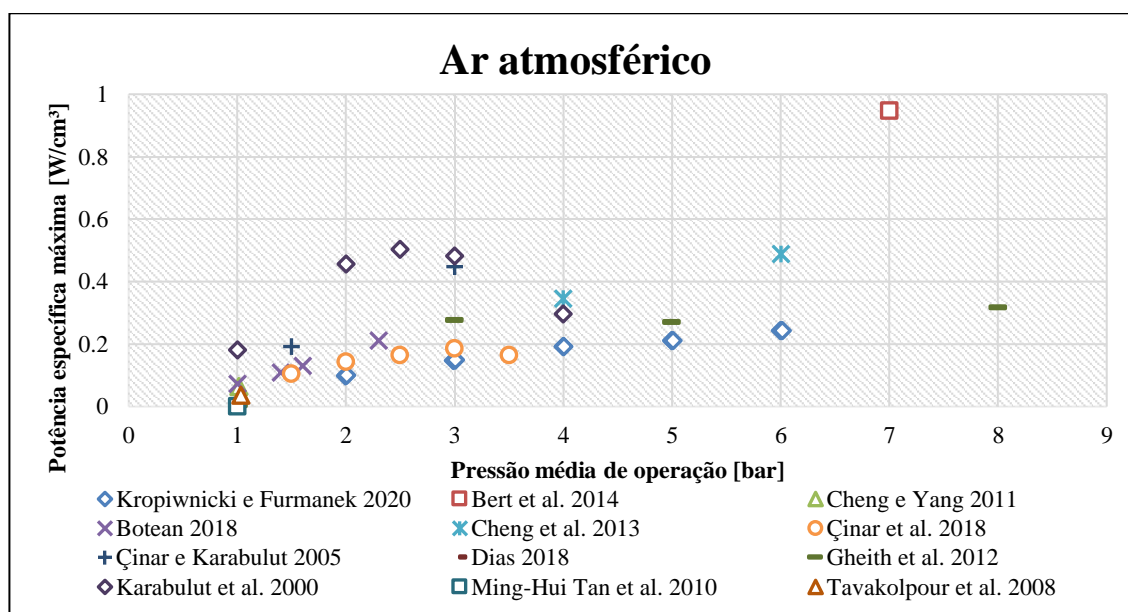


Figura 4. Potência específica máxima em função da pressão média de operação para o hélio

O fato de o ar trabalhar em pressões menores que o hélio também pode indicar que há uma parcela de perdas dependentes apenas do fluido de trabalho. Tais perdas de natureza térmica e mecânica influenciam o comportamento do pico de potência dos motores, ou seja, causam o decréscimo de potência com aumento da pressão, como discutido por Bert *et al.* (2014) e Hachem *et al.* (2018).

Para o hélio, este comportamento é menos evidente, já que alguns motores apresentaram comportamento bastante uniforme, sem o comportamento parabólico com decaimento da potência específica a partir de certa pressão média de operação. Esse comportamento pode indicar que o motor poderia operar em pressões ainda maiores do que as testadas, visto que não houve um ponto de máximo claro nas potências específicas máximas, já que as curvas aparentam ser lineares na faixa de pressão apresentada.

Para o ar atmosférico, há motores que faltam mais dados de pressões para indicar uma tendência de comportamento, caracterizado por motores que operaram em até duas pressões médias de operação. Para os outros motores que tiveram variação na pressão média de operação, observa-se que ocorre um comportamento semelhante ao hélio, porém em pressões menores (até 4bar).

Com a finalidade de agrupar os motores em termos de volume, para diversas pressões de operação, tem-se a Fig. 5 relativa aos dois fluido de trabalho.

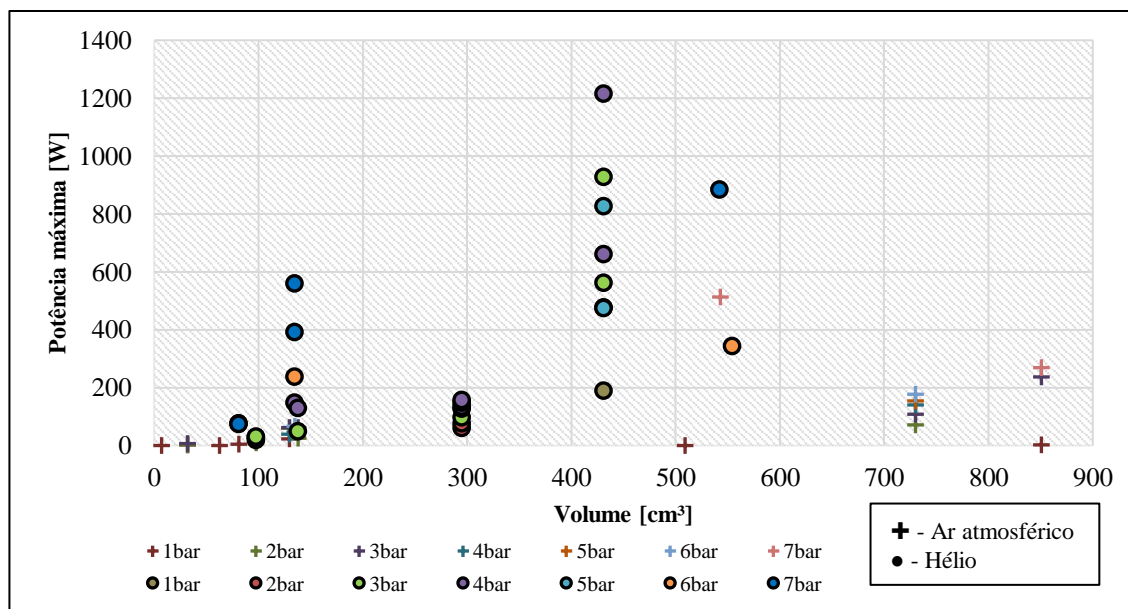


Figura 5. Potência máxima em função do volume varrido de expansão para diversas pressões

Para o hélio observa-se que a maioria das operações ocorreram em motores de volumes varridos de expansão entre 80 a 150 cm³ e também entre 290 a 435 cm³. Para o ar, por outro lado, tem-se uma concentração entre 7 a 138 cm³ e 700 a 900cm³. É possível que várias operações com motores pequenos – relativos aos limites estudados nesse trabalho – abaixo de 200cm³ se deva à facilidade de manufatura de motores menores, além da praticidade nos experimentos.

Para o ar atmosférico, a concentração em motores em dois extremos abaixo e acima de 400 cm³ pode ser atrelado à configuração dos motores em relação à disposição dos pistões (α, β, γ).

Os motores γ possuem razões de compressão (determinadas pelo mecanismo de transmissão de movimento) menores, assim como menores temperaturas de trabalho. Os motores α operam em maiores pressões e os β possuem uma geometria mais compacta, ótima densidade de potência e médias razões de compressão (Egas e Clucas, 2018; Ahmed *et al.*, 2019). Desta maneira, pode ser que para o ar atmosférico, que atua em menores pressões, os motores α e γ sejam mais apropriados e justifiquem suas ocupações nesses extremos. Para o hélio, por outro lado, por serem compactos e retornarem boa potência de saída (Egas e Clucas, 2018), os β podem ser mais apropriados para fluidos de maior desempenho e razões de compressões intermediárias.

Apesar de artigos tratarem de simulações e discussões acerca das configurações α, β, γ , como publicado por Abuelyamen e Ben-Mansour (2018) e Egas e Clucas (2018), pouco se pode afirmar sobre quais as potências típicas para cada configuração, além de agrupamentos quanto às variáveis de operação e às variáveis de projeto.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo foram investigados diversos motores de Stirling à luz da potência específica em diferentes pressões médias de operações para o ar atmosférico e o hélio. Constatou-se que os motores que operam com hélio possuem a potência específica mais de quatro vezes maior que os que operam a ar em termos médios. Observou-se que os motores a ar operam em pressões médias de operação até 4bar, o que pode ser apoiado em relação às configurações dos motores. Respondeu-se sobre qual fluido de trabalho é utilizado para um motor com base na potência específica para o grupo de motores estudados. Por fim, também se verificou uma lacuna científica e uma oportunidade de trabalho futuro relativa às configurações dos motores de Stirling quanto às potências de saída típicas.

6. REFERÊNCIAS

- Abuelyamen, A., Ben-Mansour, R., 2018. "Energy efficiency comparison of Stirling engine types (α , β , and γ) using detailed CFD modeling". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 132, p. 411–423.
- Abuelyamen, A., Ben-Mansour, R., Abualhamayel, H., Mokheimer, E.M.A., 2017. "Parametric study on beta-type Stirling engine". *Energy Conversion and Management*, Vol. 145, p. 53–63.
- Ahmadi, M.H., Ahmadi, M.-A., Pourfayaz, F., 2017. "Thermal models for analysis of performance of Stirling engine: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, p. 168–184.
- Ahmed, F., Hulin, H., Khan, A.M., 2019. "Numerical modeling and optimization of beta-type Stirling engine". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 149, p. 385–400.
- Aksoy, F., Solmaz, H., Çınar, C., Karabulut, H., 2017. "1.2 kW beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism: 1.2 kW beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism". *Int. J. Energy Res.*, Vol. 41, p. 1310–1321.
- Altin, M., Okur, M., Ipci, D., Halis, S., Karabulut, H., 2018. "Thermodynamic and dynamic analysis of an alpha type Stirling engine with Scotch Yoke mechanism". *Energy*, Vol. 148, p. 855–865.
- Bahrami, M., Hamidi, A.A., Porkhial, S., 2013. "Investigation of the effect of organic working fluids on thermodynamic performance of combined cycle Stirling-ORC". *Int J Energy Environ Eng*, Vol. 4, p. 12.
- Bataineh, K., 2018. "Mathematical formulation of alpha -type Stirling engine with Ross Yoke mechanism". *Energy*, Vol. 164, p. 1178–1199.
- Bert, J., Chrenko, D., Sophy, T., Le Moyne, L., Sirot, F., 2014. "Simulation, experimental validation and kinematic optimization of a Stirling engine using air and helium". *Energy*, Vol. 78, p. 701–712.
- Brunetti, F., 2012. *Motores de Combustão Interna*, 3rd ed. Blucher, São Paulo.
- Campos, M.C., Vargas, J.V.C., Ordonez, J.C., 2012. "Thermodynamic optimization of a Stirling engine". *Energy*, Vol. 44, p. 902–910.
- Chahartaghi, M., Sheykhi, M., 2018. "Energy and exergy analyses of beta-type Stirling engine at different working conditions". *Energy Conversion and Management*, Vol. 169, p. 279–290.
- Cheng, C.-H., Yang, H.-S., Keong, L., 2013. "Theoretical and experimental study of a 300-W beta-type Stirling engine". *Energy*, Vol. 59, p. 590–599.
- Damirchi, H., Najafi, G., Alizadehnia, S., Mamat, R., Nor Azwadi, C.S., Azmi, W.H., Noor, M.M., 2016. "Micro Combined Heat and Power to provide heat and electrical power using biomass and Gamma-type Stirling engine". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 103, p. 1460–1469.
- Dincer, I. (Ed.), 2018. *Comprehensive energy systems*. Ibrahim Dincer, Canada.
- Egas, J., Clucas, D., 2018. "Stirling Engine Configuration Selection". *Energies*, Vol. 11, p. 584.
- El-Ghafour, S.A., El-Ghandour, M., Mikhael, N.N., 2019. "Three-dimensional computational fluid dynamics simulation of stirling engine". *Energy Conversion and Management*, Vol.180, p. 533–549.
- Erol, D., Yaman, H., Doğan, B., 2017. "A review development of rhombic drive mechanism used in the Stirling engines". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 78, p. 1044–1067.
- Gheith, R., Aloui, F., Nasrallah, S.B., 2012a. "Study of the regenerator constituting material influence on a gamma type Stirling engine". *J Mech Sci Technol*, Vol. 26, p. 1251–1255.
- Gheith, R., Aloui, F., Tazerout, M., Ben Nasrallah, S., 2012b. "Experimental investigations of a gamma Stirling engine: *Int. J. Energy Res.*, Vol. 36, p. 1175–1182.
- Hachem, H., Gheith, R., Aloui, F., Ben Nasrallah, S., 2018. "Technological challenges and optimization efforts of the Stirling machine: A review". *Energy Conversion and Management*, Vol. 171, p. 1365–1387.
- Jan, W., Marek, P., 2016. "Mathematical Modeling of the Stirling Engine". *Procedia Engineering*, Vol. 157, p. 349–356.
- Katooli, M.H., Askari Moghadam, R., Hooshang, M., 2020. "Investigation on effective operating variables in gamma-type Stirling engine performance: a simulation approach". *SN Appl. Sci.*, Vol.2, p. 725.
- Musmar, S.A., Tlili, I., 2015. "Numerical Investigation of Working Fluid Effect on Stirling Engine Performance". *Environmental Engineering*, Vol. 6.
- Ni, M., Shi, B., Xiao, G., Peng, H., Sultan, U., Wang, S., Luo, Z., Cen, K., 2016. "Improved Simple Analytical Model and experimental study of a 100W β -type Stirling engine". *Applied Energy*, Vol. 169, p. 768–787.
- Sala, F., Invernizzi, C.M., 2014. "Low temperature Stirling engines pressurised with real gas effects". *Energy*, Vol. 75, p. 225–236.
- Santos, A.C.Á., Cunha, F.A. da, Brasil, A.C. de M., 2015. "Numeric Analysis Of An Adiabatic Model In A Stirling Engine". In: *23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Sissine, F., 2014. "Renewable Energy R&D Funding History: A Comparison with Funding for Nuclear Energy", *Fossil Energy, and Energy Efficiency R&D*.
- Smith, L., Nuel, B., Weaver, S.P., Berkower, S., Gross, B., 2016. "25 kW Low-Temperature Stirling Engine for Heat Recovery, Solar, and Biomass Applications". In: *International Stirling Engine Conference*, p. 20.
- Sorensen, B., 1991. "A history of renewable energy technology", *Energy Policy*, Vol. 19, p. 5.
- Thombare, D., Verma, S.K., 2008. "Technological development in the Stirling cycle engines". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, p. 1–38.

- Thombare, D.G., Karmare, S.V., 2012. "Theoretical and experimental investigation of Alfa type bio mass Stirling engine with effect of regenerator effectiveness, heat transfer, and properties of working fluid". *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 4.
- Van Wylen, G.J., Sonntag, R.E., Borgnakke, C., 2006. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. Edgard Blucher, São Paulo.
- Wang, K., Sanders, S.R., Dubey, S., Choo, F.H., Duan, F., 2016. "Stirling cycle engines for recovering low and moderate temperature heat: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, p. 89–108.
- Yang, H.-S., Cheng, C.-H., 2017. "Development of a beta-type Stirling engine with rhombic-drive mechanism using a modified non-ideal adiabatic model". *Applied Energy*, Vol. 200, p. 62–72.
- Yunus, M., Alsoufi, M.S., Rathod, A.K., 2016. "Design, Manufacture and Measurements of Beta-Type Stirling Engine with Rhombic Drive Mechanism". *MME*, Vol. 06, p. 113–128.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.