



INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROJETO SOBRE A EFICIÊNCIA TÉRMICA E A POTÊNCIA INDICADA DE UM MOTOR STIRLING

Vinícius Sousa Costa

Lohanna Ferreira Paiva

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG
vinicius.sousa@ufu.br; lohanna.ufu@gmail.com

Alexandre Zuquete Guarato

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG
azguarato@gmail.com

Resumo. O consumo energético crescente na atualidade, aliado à diminuição das reservas de algumas das principais fontes de energia do planeta, como petróleo e carvão mineral, tornam necessário aproveitar da melhor forma possível as fontes energéticas disponíveis. Nesse sentido, a alta eficiência térmica dos motores Stirling e sua versatilidade os tornam bastante adequados a essa necessidade. Esse trabalho visa contribuir para a otimização do projeto desses motores. Utilizando um modelo matemático de primeira ordem de um motor Stirling tipo alfa e um algoritmo de simulação desenvolvido no software MATLAB®, analisou-se os efeitos de parâmetros de projeto desses motores sobre sua eficiência térmica e a potência indicada. As simulações retornaram que, quanto maior a diferença de temperatura entre as câmaras do motor, maiores são a eficiência e a potência obtidas. Além disso, concluiu-se que a redução dos volumes mortos do motor e do volume de seu regenerador, e o aumento do ângulo de fase entre os pistões (até o limite de 90°) também contribuem para o aumento da potência extraída do motor. Ainda, a partir da otimização desses parâmetros no algoritmo desenvolvido, obteve-se aumentos de 79,5% para a potência e 9,1% para a eficiência, frente a um motor previamente simulado.

Palavras chave: Motores Stirling. Potência. Eficiência térmica. Simulação. Parâmetros de construção.

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da organização World Energy Council (2016), a maior parte da energia mundial ainda é gerada pela queima de carvão (29,20%) e de petróleo (32,94%), que são recursos não renováveis. Entretanto, as formas convencionais de aproveitamento desses combustíveis são bastante ineficientes, como os motores de combustão interna, cuja eficiência térmica fica em torno de 33% (Aladayleh; Alahmer, 2015). Com as preocupações ambientais, surge a necessidade de se aproveitar melhor as fontes de energia disponíveis. Nesse cenário, os motores Stirling surgem como uma boa alternativa, dada sua alta eficiência térmica e sua versatilidade: tendo em vista que eles são motores de combustão externa, eles podem trabalhar com, basicamente, qualquer fonte de calor, como o calor obtido através da queima de combustíveis fósseis, da energia solar (Bhagat *et al.*), ou até mesmo o calor recuperado de outras máquinas, como motores de combustão interna (Guarato *et al.* 2017).

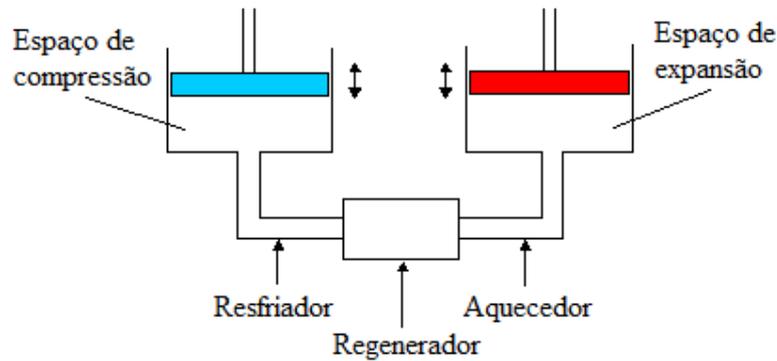
Estudos que visem otimizar o funcionamento dos motores Stirling são, então, necessários, dado que essas máquinas têm grande potencial de utilização frente às atuais necessidades energéticas da sociedade. Dessa forma, esse trabalho visa analisar a influência de parâmetros de projeto dos motores Stirling do tipo alfa sobre sua eficiência térmica e sua potência indicada, por meio de um algoritmo de simulação desenvolvido no software MATLAB®, baseado em um modelo matemático de primeira ordem. Assim, pode-se determinar de que maneira cada parâmetro afeta a eficiência térmica e a potência de um dado motor Stirling, bem como otimizar esses parâmetros para funcionamento mais potente e eficiente desse motor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Motores Stirling são motores de combustão externa que funcionam em ciclo fechado (Sonntag; Borgnakke; Van Wylen, 2003), ou seja, com volume total de fluido de trabalho constante. Essas características são vantajosas frente aos motores de combustão interna, haja vista que permite aos motores Stirling funcionarem com, basicamente, qualquer fonte de calor, pois precisam apenas de uma diferença de temperatura entre suas câmaras para trabalharem. O motor Stirling tipo alfa é definido por Cruz (2012) como tendo um cilindro quente e um frio, que funcionam, respectivamente, como espaços de expansão e compressão, fornecendo e retirando calor do fluido de trabalho. A Figura 1 ilustra a configuração

padrão de um motor Stirling alfa. Nela, observa-se a presença do regenerador entre as porções quente e fria do motor. Esse dispositivo é um trocador de calor que recebe calor do fluido quente para, posteriormente, devolvê-lo ao fluido frio, de forma a pré aquecê-lo para a próxima fase do ciclo, o que aumenta sobremaneira a eficiência térmica do motor (Chaugaonkar; Gehlot; Parashar, 2014).

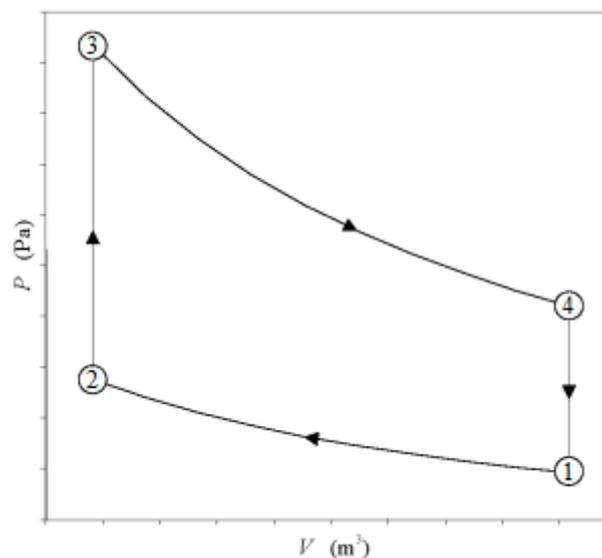
Figura 1. Configuração padrão de um motor Stirling tipo alfa (adaptado de <<https://www.real-world-physics-problems.com/stirling-engine.html>>)



É necessário ressaltar que o regenerador, embora contribua para o aumento da eficiência do motor Stirling, constitui um “volume morto”. Esses são os espaços no motor que não são percorridos pelos pistões e podem ocupar, em média, até 58% do volume total do motor. Sabe-se que eles devem ser minimizados para o melhor funcionamento dessas máquinas (Giannakakis *et al.*, 2007).

Os motores Stirling funcionam segundo o ciclo termodinâmico Stirling, que consiste em dois processos a volume constante e dois processos isotérmicos. A Figura 2 representa o diagrama p-V para este ciclo, que será descrito a seguir, de acordo com Vidal e Lima (2014).

Figura 2. Ciclo termodinâmico Stirling (Gaynor *et al.*, 2008)



- Durante o processo 1-2 do ciclo, o volante de inércia do motor em funcionamento move o pistão frio para cima, fazendo-o comprimir o fluido de trabalho. O calor gerado pela compressão é removido do gás pelo regenerador, o que caracteriza um processo isotérmico.
- No processo 2-3, o pistão frio continua subindo até o ponto mais alto de sua câmara, enquanto o pistão quente desce. Isso faz com que o fluido passe pelo regenerador, que continha calor proveniente dos processos 4-1 e 1-2 anteriores. Assim, ele recebe calor e a pressão do sistema aumenta, devido ao volume constante.
- O processo 3-4, por sua vez, caracteriza uma expansão isotérmica, em que o gás é aquecido pela fonte de calor externa, se expande e, então, empurra o pistão da câmara quente para baixo.

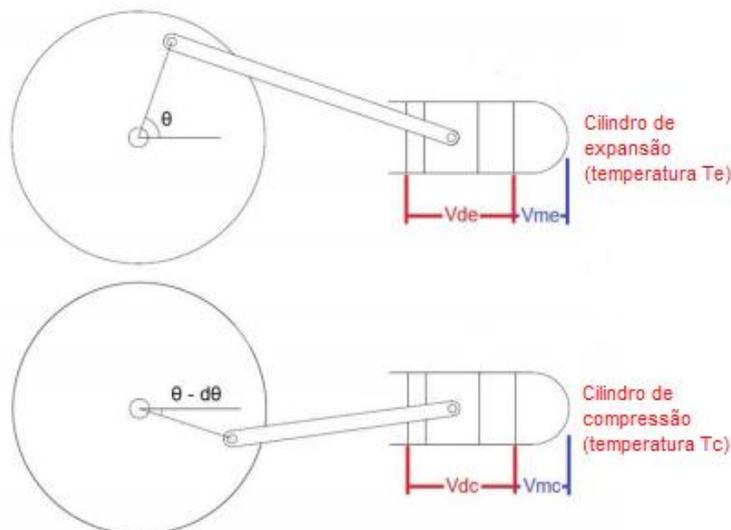
- Por fim, no processo 4-1, o pistão quente retorna ao ponto mais alto de sua câmara, enquanto o pistão frio vai para o ponto mais baixo de seu cilindro. Isso força o gás a passar pelo regenerador, que retém seu calor, em direção à câmara fria. Essa transformação ocorre a volume constante e causa uma queda de pressão no fluido.

3. METODOLOGIA

O método escolhido para o estudo proposto foi o desenvolvimento de um algoritmo de simulação, baseado em modelo matemático Schmidt de um motor Stirling do tipo alfa, e implementado no software MATLAB®, semelhante ao do trabalho de Moura (2017). Esse código permitiu a variação dos seguintes parâmetros de projeto dos motores Stirling: ângulo de fase, razão entre as temperaturas de compressão e expansão dos cilindros, volume relativo do regenerador e razão entre os volumes mortos do motor e o volume de expansão. Como resultados, ele retornou gráficos que permitem a comparação das influências de cada parâmetro sobre a potência e a eficiência do motor, e, também, retornou os melhores valores desses parâmetros para o motor Stirling analisado.

A Figura 3 mostra esquematicamente alguns parâmetros analisados nesse trabalho. Nela, $d\theta$ é o ângulo de fase, que corresponde ao ângulo de defasagem entre o movimento sinusoidal dos pistões, T_e e T_c são, respectivamente, as temperaturas de expansão e compressão do motor e V_{me} e V_{mc} são os volumes mortos de expansão e compressão.

Figura 3: Modelo esquemático do motor Stirling alfa, ressaltando os parâmetros analisados (adaptado de Moura, 2017).



O modelo matemático utilizado, pautado no trabalho de Hirata (1995), leva em conta com as seguintes considerações:

- O volume de fluido de trabalho nas câmaras de expansão e de compressão varia de forma sinusoidal;
- Não há perda de pressão nos trocadores de calor, nem diferença de pressão dentro do sistema;
- O fluido de trabalho se comporta como um gás ideal;
- Os processos de expansão e compressão são isotérmicos;
- A regeneração é considerada perfeita;
- Os volumes mortos de expansão e compressão têm, respectivamente, as mesmas temperaturas de expansão e de compressão do fluido de trabalho;
- A temperatura do gás no regenerador é a média aritmética das temperaturas de expansão e compressão;

Devido às simplificações feitas por esse modelo, os resultados obtidos para a eficiência térmica e potência indicada do motor são, em média, 30% maiores que os valores reais (Alfarawi; Al-Dadah; Mahmoud, 2016). No entanto, eles fornecem bons indícios de como o motor Stirling se comporta.

Para o cálculo da eficiência térmica do motor Stirling tipo alfa no modelo utilizado, é necessário que se defina a razão de temperatura T_{ra} , dada como a razão entre a temperatura de compressão T_c e a temperatura de expansão T_e . Assim:

$$T_{ra} = \frac{T_c}{T_e} \quad (1)$$

Define-se, também, a razão de volume de deslocamento V_{ra} , dada pela razão entre os volumes de deslocamento do pistão de compressão V_{dc} e de expansão V_{de} , como na Eq. (2).

$$V_{ra} = \frac{V_{dc}}{V_{de}} \quad (2)$$

As razões de volumes mortos de expansão (V_{mrae}) e compressão (V_{mrac}) são, por sua vez, dadas respectivamente pelas Eq. (3) e Eq. (4). Na Eq. (3), se faz a razão entre o volume morto de expansão V_{me} e o volume de deslocamento de expansão V_{de} . A Eq. (4) é análoga à Eq. (3), e considera o volume morto de compressão V_{mc} .

$$V_{mrae} = \frac{V_{me}}{V_{de}} \quad (3)$$

$$V_{mrac} = \frac{V_{mc}}{V_{dc}} \quad (4)$$

A razão de volume do regenerador V_{rar} é dada na Eq. (5) como sendo a razão entre o volume do regenerador V_r e o volume de deslocamento do pistão de expansão.

$$V_{rar} = \frac{V_r}{V_{de}} \quad (5)$$

Como especificado nas considerações feitas acerca do modelo matemático, a temperatura do regenerador T_r é dada pela média aritmética entre as temperaturas de expansão T_e e de compressão T_c . Assim:

$$T_r = \frac{T_e + T_c}{2} \quad (6)$$

As seguintes equações, por sua vez, definem as variáveis auxiliares a , S , B e c , necessárias ao cálculo da eficiência térmica e da potência do motor Stirling no modelo proposto. O ângulo $d\theta$ é o ângulo de fase entre os pistões.

$$a = \tan^{-1} \left(\frac{V_{ra} \cdot \sin d\theta}{T_{ra} + \cos d\theta} \right) \quad (7)$$

$$S = T_{ra} + 2T_{ra}V_{mrae} \frac{4T_{ra}V_{rar}}{1+T_{ra}} + V_{ra} + 2V_{mrac} \quad (8)$$

$$B = \sqrt{T_{ra}^2 + 2T_{ra}V_{ra} \cos d\theta + V_{ra}^2} \quad (9)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (10)$$

Com o auxílio das variáveis acima, pode-se, então, calcular a energia de expansão indicada E_e e a energia indicada E_i , como exposto nas equações abaixo.

$$E_e = \frac{P_{med} \cdot V_{de} \cdot \pi \cdot c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (11)$$

$$E_i = \frac{P_{med} \cdot V_{de} \cdot \pi \cdot c \cdot (1 - T_{ra}) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (12)$$

Então, a eficiência térmica η_t do motor e sua potência indicada H_i são dadas, respectivamente, pelas Eq. (13) e Eq. (14).

$$\eta_t = \frac{E_i}{E_e} \quad (13)$$

$$H_i = E_i \cdot n \quad (14)$$

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de entrada utilizados para o modelo matemático em questão. Esses são semelhantes aos dados utilizados por Hirata (1995). A Tabela 2, por sua vez, apresenta os limites de variação para os parâmetros que foram analisados nesse trabalho. Esses valores foram definidos com base em situações possíveis de trabalho para os motores Stirling: o limite inferior da razão de temperatura, igual a 0,40, por exemplo, pode indicar uma temperatura de expansão de 756 K e uma temperatura de compressão de 303 K; o ângulo de fase, por sua vez, varia entre

30° e 90°; já os volumes mortos e o volume do regenerador variam entre valores que levam em conta a média máxima considerada por Giannakakis *et al* (2007) para os volumes mortos, que podem representar até 58% do volume total do motor.

Tabela 1. Dados de entrada usados no modelo matemático desenvolvido

Dado de entrada	Valor
Temperatura de expansão (K)	673
Temperatura de compressão (K)	303
Pressão média (Pa)	$1,01 \times 10^5$
Volume de deslocamento de expansão (m ³)	$6,28 \times 10^{-7}$
Volume de deslocamento de compressão (m ³)	$6,28 \times 10^{-7}$
Volume morto de expansão (m ³)	$2,00 \times 10^{-7}$
Volume morto de compressão (m ³)	$2,00 \times 10^{-7}$
Volume do regenerador (m ³)	$2,00 \times 10^{-7}$
Constante do gás (J/kg.K)	286,9
Ângulo de fase (°)	90

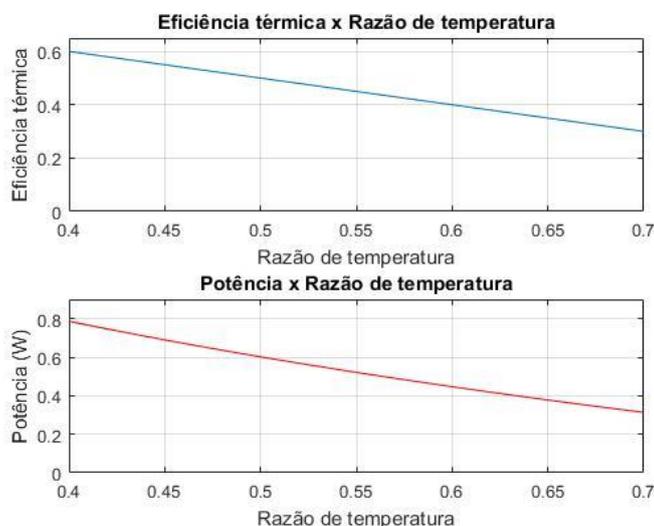
Tabela 2. Limites de variação dos parâmetros analisados no trabalho

Parâmetro	Faixa de variação
Razão de temperatura	0,40 – 0,7
Ângulo de fase (°)	30 - 90
Razões de volumes mortos	0,1 – 0,6
Volume relativo do regenerador	0,1 – 0,3

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

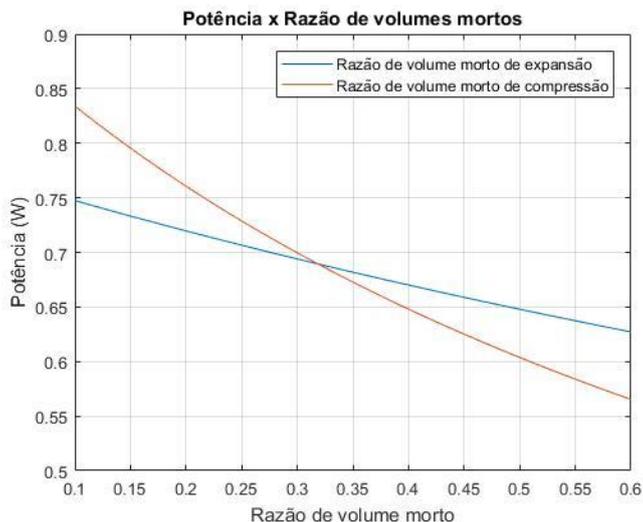
A Figura 4 relaciona a razão de temperatura à eficiência térmica e à potência do motor. A análise da eficiência retornou que apenas a razão de temperatura afeta essa variável de saída, segundo o modelo matemático Schimdt utilizado. Foi constatado que a diminuição no valor desse parâmetro, ou seja, o aumento da diferença entre as temperaturas de expansão e de compressão, aumenta a eficiência térmica do motor. Além disso, a redução no valor da razão de temperatura faz com que o motor consiga maior potência indicada, o que permite afirmar que os motores Stirling alfa trabalham melhor quanto maior for a diferença de temperatura entre suas porções quente e fria, resultado também encontrado nos trabalho de Iwamoto *et al* (1997).

Figura 4. Gráficos da razão de temperatura pela eficiência e potência do motor.



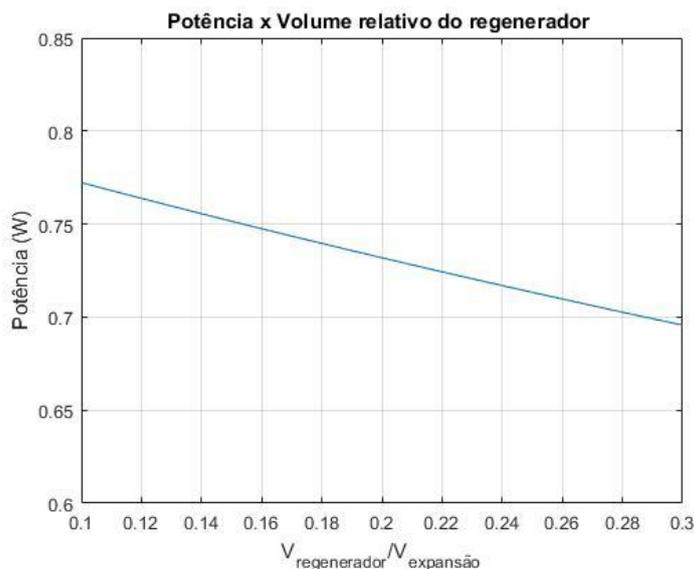
O gráfico da Fig. 5, por sua vez, relaciona os volumes mortos à potência. Conforme se verifica, a redução desses volumes, representados no gráfico pela razão de volumes mortos, resulta no aumento da potência dessas máquinas. Isso se justifica pelo fato de que, nos volumes mortos, não há realização de trabalho pelos pistões ou sobre os pistões, haja vista que esses não percorrem esses espaços ditos “mortos”. Como consequência, sua presença diminui a potência que se consegue extrair desses motores. Dessa forma, embora inevitáveis, esses volumes devem ser reduzidos para a otimização do funcionamento das máquinas Stirling.

Figura 5. Gráfico da potência pelas razões de volumes mortos do motor.



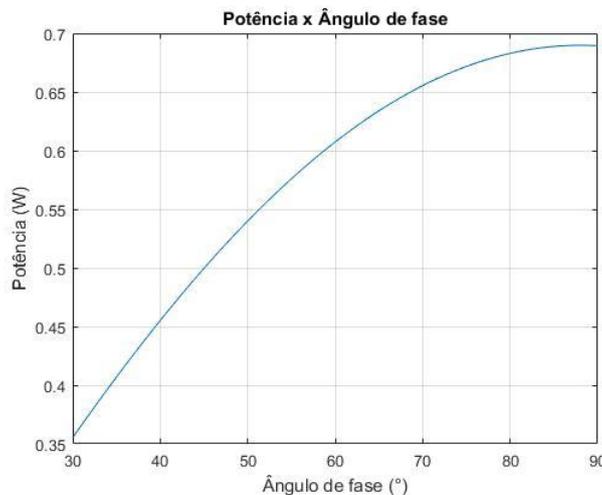
A avaliação do volume relativo do regenerador retornou os resultados dispostos no gráfico da Fig. 6. Como se observa, a redução no valor desse parâmetro, isto é, a redução do volume do regenerador em relação ao volume do espaço de expansão, permite obter maior potência para o motor Stirling alfa analisado. Esse resultado pode ser atribuído ao fato de que o regenerador, embora favoreça o aumento da eficiência térmica e da potência do motor, constitui um volume morto. Dessa forma, mantendo-se a eficácia do regenerador e sua capacidade de trocar calor, é indicado que se reduza o seu volume para melhor funcionamento dos motores Stirling.

Figura 6. Gráfico da potência pelo volume relativo do regenerador.



Ainda, analisou-se o impacto do ângulo de fase do motor, isto é, do ângulo de defasagem entre o movimento sinusoidal dos pistões de expansão e compressão, em sua potência indicada. Os resultados obtidos sugerem que, quanto mais próximo de 90° estiver o valor desse ângulo, maior a potência que se obtém para o motor. O gráfico da Fig. 7 expõe o comportamento descrito.

Figura 7. Gráfico da potência pelo ângulo de fase



Por fim, avaliados os efeitos de cada parâmetro sobre o motor Stirling tipo alfa, foi determinado o conjunto de parâmetros que fornece as melhores condições de funcionamento para a máquina analisada, isto é, a maior eficiência térmica e a maior potência. No trabalho de Moura (2017), utilizando os mesmos dados da tabela 1, obteve-se eficiência térmica de 55% e potência indicada de 0,689W. A otimização realizada nesse trabalho permitiu que se obtivesse eficiência igual a 60% e potência de 1,237 W. Para a eficiência térmica, isso corresponde a um aumento de 9,1 %, enquanto, para a potência do motor, o aumento foi de 79,5%.

Além disso, os parâmetros analisados que permitiram chegar aos resultados expostos acima foram os seguintes:

- Razão de temperatura $T_{ra} = 0,4$
- Razões de volumes mortos de expansão e compressão $V_{mrae} = V_{mrac} = 0,1$
- Volume relativo do regenerador $V_{rar} = 0,1$
- Ângulo de fase $d\theta = 90^\circ$

Uma última análise pode ser realizada acerca dos parâmetros que forneceram a maior potência e a maior eficiência para o motor Stirling simulado: conforme se observa, a menor razão de temperatura, as menores razões de volumes mortos, o menor volume relativo do regenerador e o ângulo de fase igual a 90° foram as condições de melhor funcionamento para o motor, conforme era esperado, de acordo com as demais simulações realizadas.

5. CONCLUSÕES

O estudo conduzido concluiu seu objetivo inicial de analisar as influências de parâmetros de projeto dos motores Stirling sobre sua potência e eficiência térmica. As análises retornaram que a diminuição da razão de temperatura do motor, redução dos volumes mortos e do volume do regenerador, e aumento do ângulo de fase (até o limite de 90°) promoveram o aumento da potência do motor. Além disso, observou-se que a redução da razão de temperatura provocou o aumento da eficiência térmica do motor. Esse trabalho obteve, também, a maior potência e a maior eficiência térmica possíveis para o motor analisado, dentro dos limites de variação dos parâmetros estabelecidos na seção de metodologia. Essas foram, respectivamente, 1,237W e 60%. Quando se compara esses valores com os obtidos no trabalho de Moura (2017), que usou um algoritmo de simulação semelhante ao desse trabalho para simular um motor Stirling com os dados da Tab.1 e obteve potência de 0,689W e eficiência térmica de 55%, esses valores representam aumentos de 79,5% para a potência e 9,1% para a eficiência do motor.

Assim, conclui-se que os resultados obtidos pelo modelo matemático de primeira ordem fornecem boa estimativa inicial do comportamento dessas máquinas térmicas. Trabalhos futuros serão baseados em modelos matemáticos de segunda ou terceira ordem para que os resultados se aproximem mais da realidade.

6. REFERÊNCIAS

- Aladayleh, W. e Alahmer, A., 2015. "Recovery of Exhaust Waste Heat for ICE Using the Beta Type Stirling Engine". *Journal of Energy*. v. 2015.
- Alfarawi, S., Al-Dadah, R.K. e Mahmoud, S., 2016. "Enhanced thermodynamic modelling of a gamma-type Stirling engine". *Applied Thermal Engineering*. v. 106, p. 1380-1390.

- Bhagat, A., Modi, A., Hinganikar, P., Tambekar, P., Kakade, N.U. e Kale, B.N., 2016. “Design of Alpha Stirling Engine in Conjunction with Solar Concentrator”. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 3, p. 261-266.
- Chaugaonkar, S., Gehlot, V. e Parashar, V., 2014. “Design and fabrication of regenerative heat exchanger for alfa Stirling engine”. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, Vol. 4, p. 829-837.
- Cruz, V.G., 2012. “Desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo gama”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- Gaynor, P., Webb, R., Lloyd, C. e Bodger, P., 2008. “A Low Temperature Differential Stirling Engine-Based Power Generation Research Programme. *Proceedings of the Second IASTED Africa Conference on Power and Energy Systems*, 2008.
- Giannakakis, G., Ferral-Smith, H., Taylor, J. e Wilson, J., 2007. “Factors Influencing the Thermodynamic Efficiency for Stirling Engines”. *PAM Review: Energy Science & Technology*, 2007.
- Guarato, A.Z., Moura, C.M., Bernardes, M.S. e Malheiros, F.C., 2017. “An experimental thermal analysis of an engine based on Stirling cycle model alpha”. In *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. Curitiba, Brazil.
- Hirata, K., 1995. “Schmidt theory for Stirling engines”. *National Maritime Research Institute, Tokyo*.
- Hirata, K., 2014. “Stirling Overview”. 30 Jun. 2019. <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/index_e.html>.
- Iwamoto, S., Toda, F., Hirata, K., Takeuchi, M. e Yamamoto, T., 1997. “Comparison of Low and High Temperature Differential Stirling Engines”. <<http://www.nmri.go.jp/oldpages/eng/khirata/list/ecoboy/lowtemp.pdf>>.
- Moura, C.M., 2017. “Análise termodinâmica de um módulo compacto baseado no ciclo Stirling para recuperação de energia dos gases de escape de um motor de combustão interna”. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, p.49.
- Sonntag, R.E., Borgnakke, C. e Van Wylen, G.J., 2003. “Fundamentos da Termodinâmica”. 6ª edição. Edgard Blücher Ltda, 577 p.
- Vidal, F. e Lima, M., 2014. “Funcionamento e Aplicação de Motores Stirling em Veículos Híbridos”. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, Faculdade de Tecnologia, Santo André, São Paulo.
- World Energy Council, 2016. “World Energy Resources 2016”. 3 Jul. 2019 <<https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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