



ANALISE TEÓRICA DE UM GERADOR LINEAR DE ENERGIA ELÉTRICA PARA REAPROVEITAMENTO DOS GASES DE ESCAPE DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

Matheus de Lima Oliveira*¹, Vinicius Silva de Almeida¹, Fillipe Hilário Oliveira¹ e Fernando Costa Malheiros¹

¹UEMG – Universidade do Estado de Minas Gerais

Resumo - Este artigo consiste em uma análise de resultados teóricos de um Gerador Linear de Energia Elétrica acoplado em um motor baseado no ciclo de Stirling para o reaproveitamento de energia dos gases de escape de um motor a combustão interna de veículos automotores. O modelo matemático do Gerador Linear é estruturado para um motor baseado no ciclo de Stirling com uma temperatura no pistão quente de 700°C é com uma rotação de 700 RPM. Com estas características do motor baseado no ciclo de Stirling estima-se que o Gerador Linear pode alcançar uma eficiência de geração de energia elétrica de 40%.

Palavras-Chave – Eficiência Energética, Gerador Linear, Reaproveitamento de Energia e Stirling.

THEORETICAL ANALYSIS OF A LINEAR GENERATOR OF ELECTRICAL ENERGY FOR ENERGY REUSE OS EXHAUST GASES INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Abstract – This article consists of an analysis of the theoretical results of Linear Electric Power generator coupled in an engine in the exhaust of an internal combustion engine od automotive vehicles. The mathematical model of the linear generator is strictired for an engine based on the Stirling cycle with a hot piston temperature og 700°C an rotation of 700 RPM. With these characteristics of the engine based on the Stirling cycle it is estimated that Linear Generator an achive an efficiency in the generation of electric energy of 40%.

Keywords – Energy Efficiency, Linear Generator, Reuse Energy and Stirling.

NOMENCLATURA

A Área (m²)

B Intensidade de Campo Magnético (T)

*matheusdelimaoliveira@gmail.com

C Constante de Foucault (m/Ω).

d Diâmetro (m)

ε Energia induzida (V)

F Frequência (Hz)

I_{ind.} Corrente induzida (A)

K Constante de histerese (m/Ω*s)

L Indutância (H)

l Comprimento (m)

Θ Variação do plano de espira (Wb)

P Potência ativa (W)

P_f Correntes de Foucault (W/m³)

P_h Perdas por histerese (W/m³)

P_j Perdas por efeito joule (W)

P_t Potência ativa total do gerador (W)

Q Potência aparente (VA)

R Resistencia do condutor (Ω)

S Potência reativa (VA)

T Período (s)

ω Frequência angular (rad/s)

X_l Resistência indutiva (Ω)

I. INTRODUÇÃO

O uso de sistemas combinados de energia é uma alternativa importante para o aumento da eficiência energética de sistemas (Sonntag at. al, 2003). Esse trabalho propõe um gerador linear de energia elétrica acoplado em um motor baseado no ciclo Stirling que tem como fonte de energia os gases de escape de um motor a combustão interna de um automóvel. O objetivo do trabalho é melhorar a eficiência energética do motor através do aproveitamento de energia térmica dos gases do escapamento para geração de energia elétrica por meio de um gerador linear.

Guizzi at. al (2014) apresentam resultados de um sistema de recuperação de energia cinética de barcos à vela, baseado na conversão de ondas e oscilações induzidas pelo barco em energia elétrica por meio de um gerador linear.

Wu at. al (2017) propõe um modelo de acoplamento Motor Joule Linear e do alternador linear de ímã permanente; eles estimam que o Gerador linear de Motores Joule do novo projeto produza 1,8 kW com eficiência térmica de 34% e eficiência de geração elétrica de 30%.

Tian at. al (2017) propõem um gerador linear de pistão livre que usa gases de escapamento no intuito de reaproveitar o calor residual para converter diretamente o sistema termodinâmico em energia elétrica.

Rama Rao at. al (2017) apresentam modelagem, simulação e projeto ideal de dois tipos de geradores lineares de ímã permanente para geração de tensões trifásicas. A configuração do estator e do rotor de geração foi modelada e simulada através de um software de aplicação interativa tridimensional, usando o software de métodos de elementos finitos ANSYS.

Gui at. al (2018) apresentam um gerador linear de ímã permanente multipolar desenvolvido para coletar energia cinética produzida pelo movimento dos membros inferiores de seres humanos e converter em energia elétrica para atender às crescentes necessidades de suprimento de energia de dispositivos eletrônicos portáteis.

O presente trabalho descreve a proposta de um gerador linear a ser acoplado em um motor baseado no ciclo Stirling que foi testado por Guarato at. al em 2017 para uma temperatura da fonte quente de 700° C.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para mensurar o potencial elétrico de um gerador de energia elétrica, pode-se adotar vários caminhos diferentes, e, neste artigo, a via escolhida apresenta-se na proposta de um gerador linear de energia elétrica, utilizando um motor baseado no ciclo Stirling para criar a variação do fluxo magnético.

A. Motores baseados no ciclo de Stirling

Os motores baseados no ciclo Stirling operam em um ciclo térmico regenerativo fechado, o qual possui, teoricamente, a mesma eficiência térmica do ciclo de Carnot. Com o intuito de converter energia térmica em trabalho mecânico, o fluido de trabalho compressível confinado no interior do motor sofre compressão e expansão periódicas em diferentes níveis de temperatura.

A energia térmica necessária para o funcionamento do motor é obtida de uma fonte externa de calor através de

trocadores de calor recuperativos. Os motores baseados no ciclo Stirling possuem uma grande flexibilidade quanto à fonte de calor e ao nível de temperatura. Esta grande flexibilidade faz com que estes modelos de motores possam ser aplicados em diversas funções.

Existem atualmente três configurações possíveis para o motor baseados no ciclo Stirling, chamadas Alfa, Beta e Gama, e o desenvolvimento deste projeto utilizou um motor com um acoplamento do tipo Alfa. A figura 1 mostra um motor com o acoplamento tipo Alfa.

Figura 1: Motor baseado no ciclo Stirling com acoplamento alfa, gerador rotativo de energia elétrica acoplado.



B. Gerador de Energia Elétrica

Um gerador de energia elétrica é um fluxo de campo magnético variante ao redor de um condutor, com isto gerando uma corrente elétrica induzida no condutor e criando assim um potencial elétrico.

Apesar de parecer um conceito simples, para se dimensionar o potencial elétrico de um gerador é necessário o conhecimento de alguns conceitos físicos-matemáticos, sendo eles:

- Campo magnético;
- Frequência;
- Condutor utilizado;
- Resistência indutiva;
- Resistência do material;
- Corrente induzida;
- Energia induzida;
- Potência aparente;
- Potência reativa;
- Potência ativa;
- Perdas do gerador;
 - ❖ Efeito joule;
 - ❖ Corrente de Foucault;
 - ❖ Histerese.
- Potência ativa total do gerador.

C. Modelo Matemático

Os conceitos físicos-matemáticos utilizados neste modelo foram obtidos em [8], [9], [10] e [11].

O primeiro ponto a ser analisado para a montagem deste gerador linear de energia elétrica é a intensidade do campo magnético (B) no interior do solenoide.

O segundo ponto é o condutor utilizado e como ele será disposto no solenoide.

O terceiro é o número de espiras do solenoide, e, por fim, o local de acoplamento do solenoide no motor.

A figura 2 mostra como o solenoide foi acoplado no motor.

Figura 2: Representação do acoplamento do solenoide no motor baseado no ciclo Stirling



Com as informações da estrutura estática do Gerador, se iniciam os primeiros cálculos, isto é, o cálculo de suas resistências. O Gerador Linear de Energia Elétrica terá duas resistências, sendo elas a resistência do condutor (R) e a resistência indutiva (Xl).

A resistência do condutor é a dificuldade que os elétrons têm ao passarem ordenadamente pelo condutor.

A resistência indutiva é a dificuldade que o campo magnético terá para fazer com que os elétrons se alinhem e movam-se ordenadamente.

O valor destas resistências são dados por:

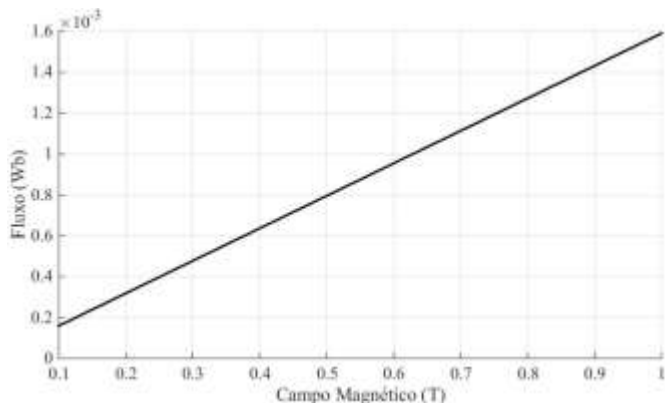
$$R = \rho * \frac{l}{A} \quad (1)$$

$$Xl = \omega * L \quad (2)$$

A geração de uma energia induzida em um gerador é dada pela variação do fluxo magnético em função da área total do gerador. Contudo, para se obter uma variação de fluxo magnético é necessário que se tenha um campo magnético.

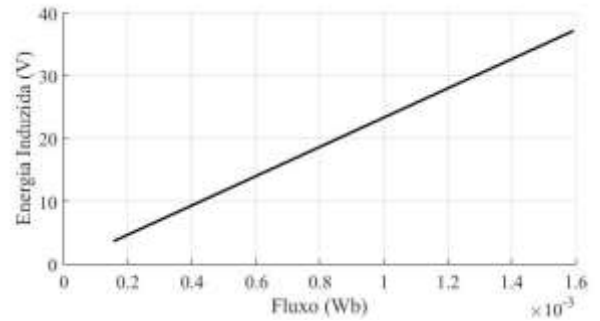
A figura 3 mostra como o campo e o fluxo magnético se relacionam.

Figura 3: Fluxo Magnético em função do Campo magnético.



A energia induzida pelo gerador é a variação deste fluxo magnético pelo tempo. A figura 4 demonstra como energia induzida depende da variação de fluxo magnético.

Figura 4: Energia induzida em função do fluxo magnético



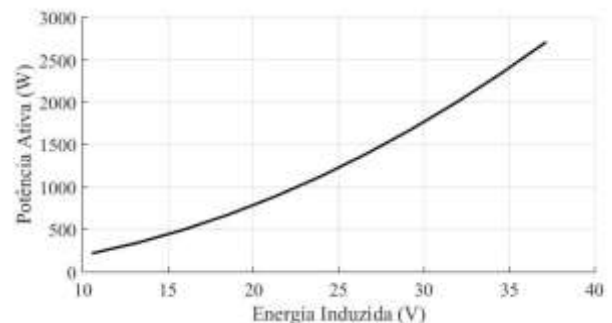
A figura 4 mostra que a energia induzida é uma função linear do fluxo magnético.

O cálculo da corrente induzida (I_{ind}).

$$I_{ind} = \frac{\epsilon}{Rt} \quad (3)$$

No dimensionamento de um gerador sempre se busca uma maior potência ativa. A potência ativa está atrelada a Energia induzida do gerador e a resistência do material do estator. A figura 5 mostra como a Energia induzida influencia na potência do gerador.

Figura 5: Potência ativa em função da energia induzida.



A figura 5 demonstra que a medida que a energia induzida aumenta a também um aumento na potência ativa do gerador. A Potência Ativa do gerador (P) é dada por:

$$P = \frac{\epsilon^2}{R} \quad (4)$$

A potência Reativa do gerador (S).

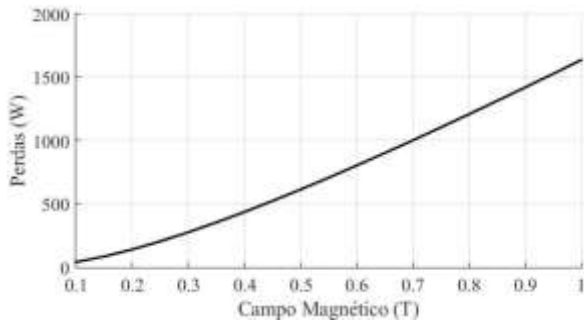
$$S = \frac{\epsilon^2}{Xl} \quad (5)$$

A potência Aparente do gerador (Q).

$$Q = \sqrt{P^2 + S^2} \quad (6)$$

Existem três perdas características de um gerador de energia elétrica; duas são perdas no núcleo magnético do gerador que são as correntes de Foucault (P_f) e as perdas por histerese (P_h); a outra perda é dada no material utilizado para a construção do estator - ela é conhecida como efeito Joule (P_j). A figura 6 mostra como o campo magnético interfere no crescimento destas perdas.

Figura 6: Perdas do gerador em função do campo magnético.



A figura 6 apresenta que as perdas do gerador aumentam à medida em que o campo magnético aumenta. As perdas do gerador são dadas por:

$$P_f = B^2 * F^2 * C \quad (7)$$

$$P_h = B^2 * F * K \quad (8)$$

$$P_j = R * I^2 * \Delta T \quad (9)$$

Estas perdas têm influência direta na potência ativa do gerador; portanto, a potência ativa total do gerador é a soma das perdas subtraídas pela sua potência ativa.

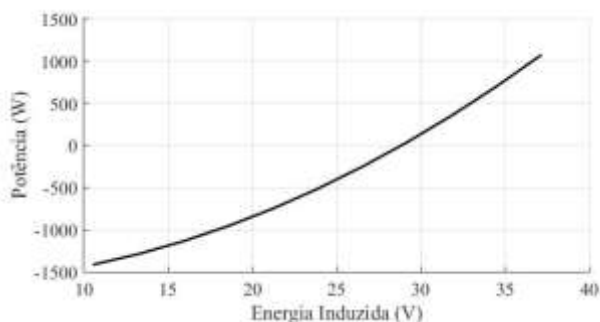
$$P_t = P - \sum(P_f + P_j + P_h) \quad (10)$$

III. ANALISE DE RESULTADOS TEÓRICOS

Os resultados que serão apresentados neste artigo têm base nos dados do motor baseado no ciclo Stirling obtidos em [7].

A figura 7 mostra o momento em que o gerador tem um consumo maior do que sua potência gerada, tendo características de um motor, o momento em que sua potência gerada é toda consumida, e, por fim, quando suas perdas geradas são menores que sua potência ativa.

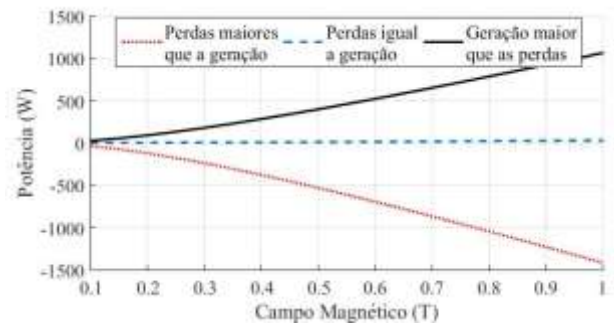
Figura 7: Potência ativa total em função da energia induzida.



Na figura 7 pode-se observar que a tensão do gerador no momento em que ele começa a fornecer potência ao sistema é de 29,15 V, aumentando sua voltagem nos primeiros segundos de funcionamento, até alcançar o registro de 37,11 V, momento este em que se estabiliza, alcançando também sua maior potência (1,1 KW) e seu maior rendimento (40%) - esta potência é o suficiente para alimentar um motor de 1,5 cv.

A figura 8 apresenta como a Potência total do gerador é influenciada pela variação de campo magnético.

Figura 8: Potência ativa total em função do campo magnético.

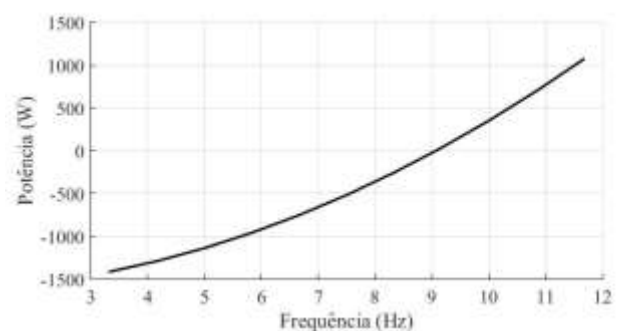


A medida que o campo magnético aumenta, há também um aumento da potência do gerador, porém, existe para os mesmos valores de campos, valores em que as perdas do gerador são maiores que sua potência gerada, valores que as perdas são iguais a geração, e, valores em que a geração é maior que as perdas.

Isto implica no fato do campo magnético não ser o quesito mais importante para se dimensionar um gerador, pois se pode encontrar estados extremamente diferentes com o mesmo valor de campo magnético.

A figura 9 apresenta como a frequência interfere na potência ativa total do gerador.

Figura 9: Potência ativa total em função da frequência.



Os valores inferiores a 9 Hz são aqueles momentos em que o gerador tem a característica de um motor, ou seja, consome mais potência do que ele consegue gerar. Para os valores superiores a 9 Hz são aqueles em que o gerador começa a ter potencial elétrico para fornecer ao sistema, até que ele atingia a marca de 11,67 Hz momento este em que ele se estabiliza.

IV. CONCLUSÃO

O objetivo deste artigo é demonstrar a viabilização da utilização de energia térmica desperdiçada pelos motores a combustão interna, utilizando um Gerador Linear para aumentar a eficiência energética destes motores; inclusive, com os resultados teóricos apresentados, prevê-se um Gerador Linear com 40% de eficiência quando comparado a outros resultados [3], demonstrando um aumento significativo da eficiência dos Geradores Lineares.

Portanto, além da reflexão teórica e dos resultados apresentados, conclui-se pela franca possibilidade de pensar, e, de até mesmo, realizar a construção do Gerador Linear ora proposto, para encontrar os resultados experimentais, e, após compara-los com os resultados teóricos aqui apresentados, considerar os reais benefícios retro apontados, ou seja, o aumento da eficiência energética dos motores a combustão interna.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Professores Gleyzer Martins e Leonardo Vilassa, por suas colaborações neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] R. E. Sonntag, G. Van Wylen and C. Borgnakke, *Fundamentos da termodinâmica*, Editora Edgard Blucher Ltda., 7ª Edição, 2009
- [2] G. L. Guizzi, M. Manno, G. Manzi, M. Salvatori, D. Serpella, “Kinetic Energy Recovery System for Sailing Vachts: Preliminary Experimental Results”, *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 799-808, Dezembro de 2014.
- [3] D. Wu, A. S. Jalal, N. Baker, “A Coupled model of the Linear Joule Engine with Embedded Tubular Permanent Magnet Linear Alternator”, *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1986-1991, Maio de 2017.
- [4] Y. Tian, H. Zhang, G. Li, X. Hou, F. Yu, F. Yang, Y. Liu, “Experimental Study on free Piston Linear Generator (FPLG) Used for Waste Heat Recovery of Vehicle Engine”, *Energy*, vol. 127, pp. 194-193, Dezembro de 2017.
- [5] K. S. Rama Rao, T. Sunderan, M. R. Adiris, “Performance and Design Optimization of Two Model based wave Energy Permanent Magnet Linear Generators”, *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 196-203, Fevereiro de 2017.
- [6] P. Gui, F. Deng, Z. Liang, Y. Cai, J. Chen, “Micro linear generator for harvesting mechanical energy from the human gait”, *Energy*, vol. 154, pp. 365-373, Julho de 2018.
- [7] A. Z. Guarato, C. M. Moura, M. S. Bernardes e F. C. Malheiros, “An Experimental Thermal Analysis of an Engine Based on a Stirling Cycle Model Alpha”, *International Congress of Mechanical Engineering*, Vol. 24, pp. 1-9, Dezembro 2017.
- [8] D. Halliday, R. Resnick, K.S. Krane, *Física 3*, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., vol. 3., 5ª Edição, Rio de Janeiro, 2002.
- [9] V. D. Toro, *Fundamentos de máquinas elétricas*, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1ª Edição, Rio de Janeiro, 1994.
- [10] S. J. Chapman, *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, AMGH Editora Ltda., 5ª Edição, São Paulo, 2013.
- [11] P. A. Tipler, G. Mosca, *Física para cientistas e engenheiros*, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., vol. 2, 6ª Edição, Rio de Janeiro, 2009.