

MEDIÇÃO DE DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO DO ROTOR DE UM ALTERNADOR COM UTILIZAÇÃO DE UM SENSOR DE EFEITO HALL

Gustavo Lourenço¹, João Christofolletti², Alvaro Catellan³, Lucas Oliveira⁴, Luciano Faria⁵

Valeo Sistemas Automotivos Ltda.

E-mails: gustavo.lourenco@valeo.com, alvaro.catellan@valeo.com,
joao.christofolletti@valeo.com, lucas.oliveira@valeo.com, luciano.faria@valeo.com

Abstract

With the current growth of the vehicular electrification market, the use of electric machines has become more common. Several components of the machine influence the performance of it, so the knowledge of specific aspects can improve the development process. The magnetic flux density is an important parameter in the performance of the machine, so methods to understand its behavior become necessary. This work presents a measurement system based on a Hall effects sensor, which is used in the measurement of the magnetic field of the rotor of a vehicular alternator. The results of the measurements are compared with the computational simulation, as result is observed a good correlation between the proposed method and the theoretical model presented.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo dissertar a respeito dos efeitos do campo magnético do rotor de um alternador e suas implicações no funcionamento dos veículos. Nos últimos anos as organizações mundiais cada vez mais estão forçando os governos a reduzirem as emissões de CO₂ no meio ambiente, e estes por sua vez como forma de incentivo oferecem rentabilidades mais interessantes para as montadoras que se comprometem com essas reduções.

Aumentar a eficiência energética do carro é uma forma de diminuir a emissão de gases, e existem várias formas de se fazer isso, uma delas é aumentando a eficiência do próprio alternador. Como qualquer gerador o alternador tem vários tipos de perdas durante o processo de conversão de energia mecânica em energia elétrica, uma delas é o aproveitamento do fluxo magnético gerado pelo rotor, que tem como função induzir corrente nas bobinas do estator.

Neste modo, fez-se um estudo com aplicação sobre como compreender melhor a distribuição das linhas de fluxo do campo magnético do rotor com o uso de sensor de efeito hall, analisando as linhas do fluxo em pontos específicos próximos do rotor, e assim poder comparar com o pacote computacional FEM (*Finite Elements Method*), analisando a aplicabilidade dos resultados, podendo assim posteriormente desenvolver alternadores que consigam aumentar a conversão do campo em corrente.

1.1. Campo Magnético e Indução de Corrente.

Importante princípio de um campo magnético criado a partir de uma bobina de corrente contínua é a lei de Ampere, a qual apresentada abaixo pela equação (1.1).

$$\oint_c B \, dl = I\mu \quad (1.1)$$

Em um circuito magnético excitado por uma corrente I encerrado em um determinado caminho c a integral da intensidade de campo magnético H ao longo do caminho c é igual a corrente aplicada.

A densidade de fluxo magnético B está relacionada com a intensidade de campo magnético H , conforme mostrado na equação (1.2), em que μ é a constante de permeabilidade do espaço livre, com o valor de $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. [1]

$$B = \mu H \quad (1.2)$$

Ainda relacionado à conservação de energia inerente à equação de Ampere e a igualdade da equação de Faraday um circuito que é percorrido por uma corrente I , gera um campo magnético B que causa um fluxo $\phi = \int B \cdot ds$ que atravessa cada espira do circuito. Se o circuito tiver N espiras idênticas, define-se o fluxo concatenado λ sendo

$$\lambda = N \cdot \phi \quad (1.3)$$

em que, caso o circuito seja considerado linear, o fluxo concatenado λ é proporcional à corrente I que o gerou, onde

$$\lambda = L \cdot I \quad (1.4)$$

sendo L a constante de proporcionalidade denominada indutância do circuito. A indutância L é uma propriedade que é a função da geometria do circuito, que pode ser considerado indutor caso tenha uma indutância. Juntando as equações 1.3 e 1.4, chega-se na equação 1.5, definindo a indutância L de um indutor como sendo a razão entre o fluxo magnético concatenado λ e a corrente I através do indutor. [1]

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} \quad (1.5)$$

1.2. Sensor de Efeito Hall

Como elemento principal do sistema foi usado o sensor “49e”, que é um sensor magnético capaz de detectar campos magnéticos provenientes de ímãs permanentes ou eletroímãs, o sensor escolhido é de montagem simples, sendo alimentado por uma tensão de 5 V nos pinos 1 e 3, apresenta uma saída linear no pino 2, proporcional à densidade do campo magnético com corrente de 4 mA e com um baixo nível de ruído o que torna desnecessário o uso de filtros no circuito, a sensibilidade 1,9 mV/G além disso o sensor é capaz de detectar campos positivos e negativos, esses atributos fizeram com que o sensor fosse escolhido para o projeto [2]. Este sensor é baseado no efeito hall, onde um material condutor ou semicondutor elétrico, percorrido por uma corrente elétrica é exposto à um campo magnético perpendicular à corrente, com isso as cargas negativas e positivas do material se acumulam em faces opostas gerando uma diferença de potencial (DDP) normal à corrente elétrica que percorre o material,

essa DDP é proporcional à intensidade do campo magnético ao qual o material é submetido, sendo este valor o sinal de saída do sensor, medido entre os pinos 2 e 3, então via programação o sistema converte o valor para Gauss e mostra medição no *Liquid Crystal Display* (LCD). [3]

1.3. Alternadores

Alternadores são geradores, que transformam a energia mecânica provida pelo motor térmico em energia elétrica, sua função é recarregar a bateria do veículo pois estão não consegue manter os consumidores do veículo ligados por muito tempo. O alternador também é responsável por regular o nível de tensão do veículo.

A polia do alternador transmite o movimento de giro do motor a combustão para o rotor. O rotor é formado por duas garras polares, anel coletor e tem uma bobina no seu interior, o controle de tensão que atua no rotor é feito pelo regulador, as duas escovas do regulador estão em contato com o anel coletor do rotor, controlando o nível de excitação.

Então a partir do comando do regulador o rotor é excitado, com tensão, essa tensão por si só gera uma corrente, o movimento do rotor gera um campo magnético, que induz corrente no estator. Caso a corrente caia demais o regulador injeta mais corrente e vice-versa. Na figura 1 é possível visualizar como o rotor é excitado.

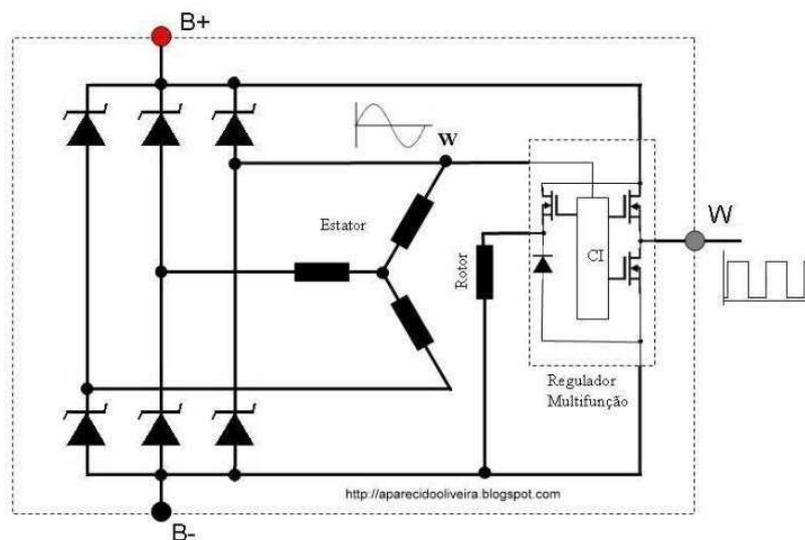


Figura [1] - Esquema elétrico do alternador.

O rotor do alternador está envolto por um estator, este pode ser ligado de forma triângulo ou estrela, depende do projeto. O campo magnético do rotor induz corrente alternada nas fases do estator, como ele é trifásico há 3 correntes 120° defasadas entre si. O carro funciona com corrente contínua, por isso é usada a ponte retificadora na saída do estator, geralmente formada de 6 diodos, ela atua retificando o sinal alternado. Nesse sistema de retificação a cada 60° apenas as duas fases de maior módulo fornecem corrente, nesse caso, a meia ponte positiva permitirá passagem das duas maiores fases positivas (em módulo) e a semi-ponte negativa fará o inverso [5].

2. METODOLOGIA DE ENSAIO E RESULTADOS

Para realização do teste em laboratório foi preparada uma estrutura para o rotor ficar posicionado na vertical e rosqueado em uma base circular. No coletor do rotor foi soldado dois cabos, sendo um positivo e outro negativo, ambos ligados à fonte. A fonte foi programada para fornecer 13,5V, e corrente de 5,1A. O modo de montagem pode ser visto na figura 2.



Figura 2 - Montagem mecânica do projeto.

O rotor energizado funciona como um eletroímã e o sensor Hall fixado na haste fez as medições de fluxo de campo. Fizeram-se 15 medições, em que a altura do rotor foi dividida em 5 partes e para cada uma delas o fluxo do campo foi obtido a uma distância pré-estabelecida, conforme figura 3.



Figura 3 - Sensor posicionado para medição

Na tabela 1 é possível visualizar os valores de fluxo medidos em relação à distância e altura do rotor.

Tabela 1 - Valores da densidade de fluxo magnético medidos pelo sensor

| | | Distância (Em relação a garra) | | |
|--------|----------|--------------------------------|----------|----------|
| | | 0mm | 5mm | 10mm |
| Altura | 0,00 mm | 241,58 G | 128,50 G | 100,23 G |
| | 12,89 mm | 938,91 G | 596,24 G | 223,00 G |
| | 25,82 mm | 722,17 G | 514,24 G | 328,82 G |
| | 38,92 mm | 580,82 G | 475,45 G | 313,34 G |
| | 51,40 mm | 364,94 G | 331,33 G | 257,00 G |

Na tabela 2 são descritos os valores encontrados na simulação realizada no software FEM (*Finite Elements Method*), que trata-se de um software que utiliza a análise por elementos finitos na simulação de sistemas que envolvem magnetismo. A análise de elementos finitos discretiza o sistema em estudo em diversos nós, tornando possível analisar como o sistema responderia a situações reais sem ter de fazer testes no mesmo. Os resultados medidos na simulação diferem dos resultados encontrados do experimento prático, pois tais discrepâncias podem ter ocorrido devido a simulação ter sido realizada em 2D, e sem considerar efeitos de perdas envolvendo o fluxo magnético do rotor.

Tabela 2 - Valores da densidade de fluxo magnético medidos em simulação

| | | Distância (Em relação a garra) | | |
|--------|----------|--------------------------------|----------|----------|
| | | 0mm | 5mm | 10mm |
| Altura | 0,00 mm | 203,14 G | 173,82 G | 132,73 G |
| | 12,89 mm | 840,51 G | 402,19 G | 205,54 G |
| | 25,82 mm | 311,69 G | 229,45 G | 159,42 G |
| | 38,92 mm | 176,37 G | 146,97 G | 111,29 G |
| | 51,40 mm | 97,16 G | 86,54 G | 72,88 G |

Para simular o rotor, usou-se o desenho técnico do mesmo para se encontrar as especificações técnicas e implementá-las na simulação, obtendo o desenho conforme mostrado na figura 4, em que é visualizado a vista superior da garra do rotor, cujo formato é trapezoidal. Para a simulação foi utilizado o software FEMM, que trata-se de um software que utiliza a análise por elementos finitos na simulação de sistemas que envolvem magnetismo, a análise de elementos finitos discretiza o sistema em estudo em diversos nós, tornando possível analisar como o sistema responderia à situações reais sem ter fazer testes reais no mesmo, pode simular por exemplo como a lataria de um carro responde à impactos e forças naturais de seu uso.

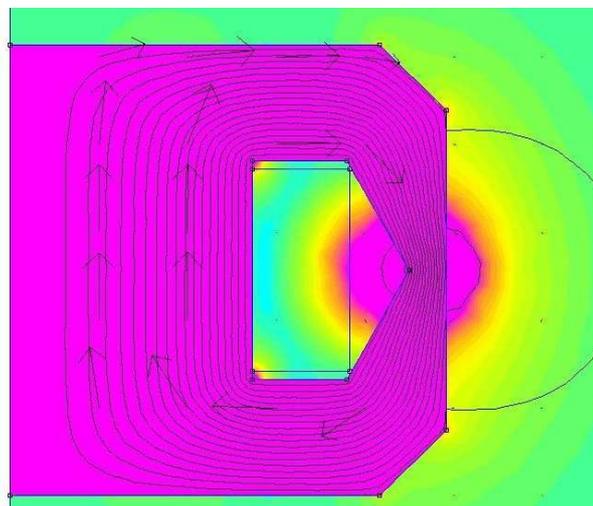


Figura 4 – Desenho da garra do rotor no FEM e as linhas de campo envolvendo a mesma

Nota-se nos resultados apresentados pelos gráficos 1 e 2, uma semelhança entre o

comportamento do campo magnético do rotor simulado e do rotor medido, e percebe-se que em ambos a densidade do campo magnético aumenta proporcionalmente à altura na qual é feita medição, até que a densidade do campo chega ao seu ápice, passando a decrescer

posteriormente. Esta altura coincide com a ponta da garra magnética medida, pois nesse ponto o volume da garra é menor, fazendo com que as linhas de campo se concentrem, aumentando densidade do campo magnético.

Gráfico 1 – Medição da densidade de fluxo magnético pelo sensor hall

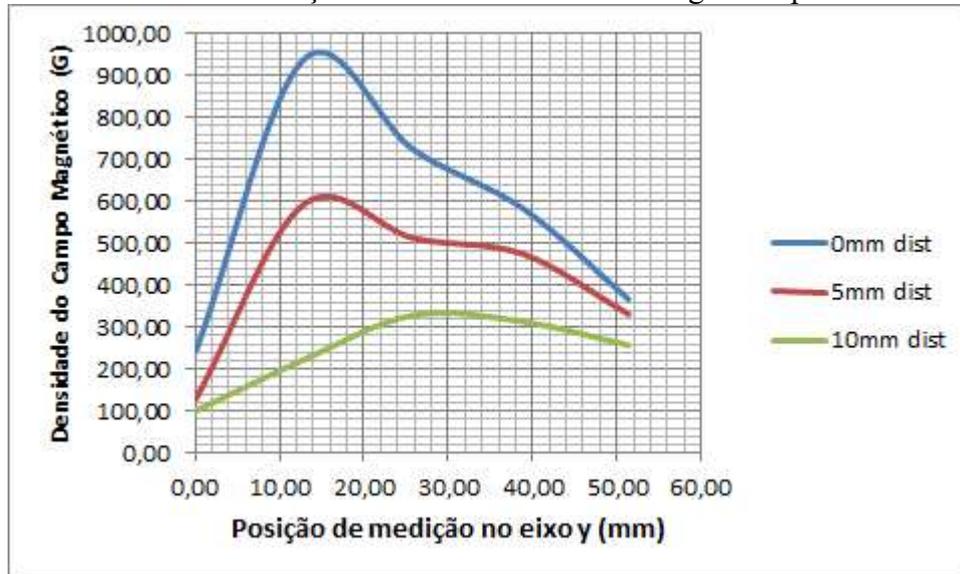
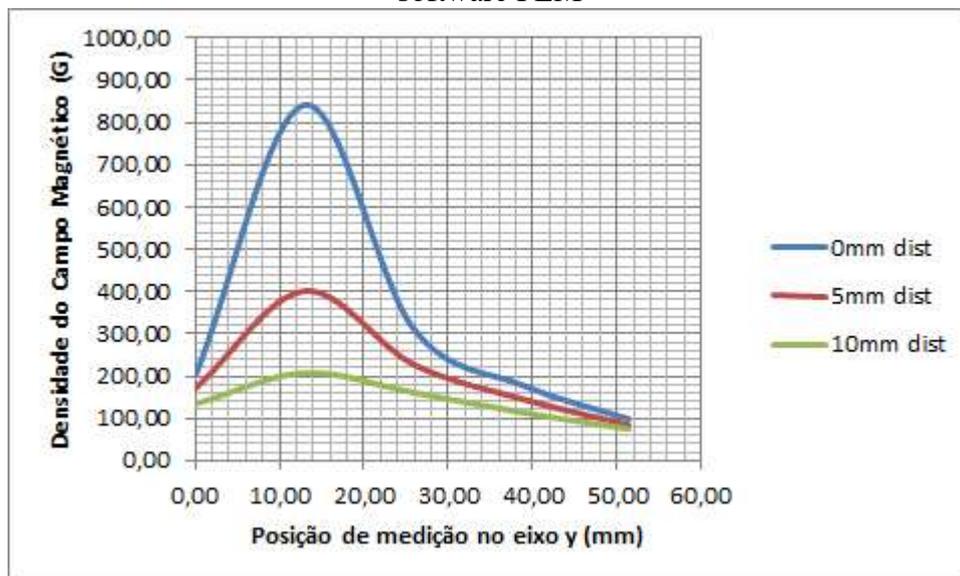


Gráfico 2 – Medição da densidade de fluxo magnético via simulação computacional pelo software FEM



CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos foi possível verificar uma relação aproximada entre o simulado e o prático, entretanto, o desvio apresentado se deve às limitações do sistema de simulação em 2D. Conforme ilustrado na figura 4, o formato de garra simulado foi baseado no formato de sua secção transversal, porém, o formato da mesma é trapezoidal, o que faz com que o modelo real seja diferente. Como o modelo real não está totalmente alinhado com a simulação, a diferença entre os resultados era esperada, o ideal nesse caso seria simular o campo em um modelo 3D aproximando ao máximo do modelo real.

Embora haja diferença entre os resultados, os valores obtidos têm muita relevância pois a partir deles é possível criar modelos de campo para ajudar na criação e validação de novos projetos. A compreensão da dispersão do campo também contribui para mais soluções que visam aumentar a eficiência da indução de corrente no alternador.

REFERÊNCIAS

- [1] SHADIKU, Matthew N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [2] HALLIDAY D.; RESNICK R. e WALKER J. Fundamentos de Física: mecânica. Volume 1. 8ª edição. Editora LTC, 2009.
- [3] YANGZHOU POSITIONING TECH.CO.,LTD. **49E Hall-Effect Linear Position Sensor**. Disponível em: <https://p.globalsources.com/IMAGES/PDT/SPEC/440/K1139513440.pdf> . Acesso em: 14 de maio de 2019.
- [4] CAPELLI, Alexandre. Eletroeletrônica automotiva, Injeção Eletrônica, Arquitetura do Motor e Sistemas Embarcados: Alternadores e Motores de Partida. Ed. **1**. São Paulo, 2010.
- [5] OLIVEIRA, Aparecido. **Contagiros do alternador digital**. Disponível em <http://aparecidooliveira.blogspot.com.br/2011/02/contagiro-com-w-do-alternador-digital.html>. Acesso em 15 de maio de 2019.
- [6] POMILIO, J. A. **Eletrônica de potência**. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/eltpot/cap3.pdf>. Acesso em: 16 de maio de 2019.
- [7] Proto Supplies. **Hall-Effect Sensor Analog 49E**. Disponível em: <https://protosupplies.com/product/analog-hall-effect-sensor-49e/> . Acesso em 20 de maio de 2019.