



A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA

THE ANALYSIS OF THE OPERATION OF A LINEAR HOMOPOLAR MOTOR AND ITS APPLICATIONS IN THE CONTEXT OF ELECTRICAL ENGINEERING

EL ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR HOMOPOLAR LINEAL Y SUS APLICACIONES EN EL CONTEXTO DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

Luiz Gustavo da Silva¹, Antonio Pinto do Nascimento Neto²

e3112210

<https://doi.org/10.47820/recima21.v3i11.2210>

PUBLICADO: 11/2022

RESUMO

Este trabalho pretende descrever o desenho, o *design* e as características operacionais de um motor homopolar usando experimentos físicos e programas de simulação. O motor homopolar converte energia elétrica em energia mecânica utilizando a força de Lorentz, o torque desta força conduz o motor homopolar para frente. O objetivo deste estudo é descrever o desenho, *design* e características operacionais de um motor homopolar, e como objetivo específico busca-se definir e caracterizar o motor homopolar; e discorrer sobre o modelo teórico em PSpice. Um modelo homopolar foi desenvolvido no *software* em PSpice. Por meio de experimentos utilizando diversos lubrificantes e uma variação de armaduras, foi possível alcançar velocidades médias máximas de 0,71m/s. A simulação no PSpice foi capaz de prever o desempenho do motor homopolar, incluindo posição e velocidade.

PALAVRAS-CHAVE: Motor homopolar. Programas de simulação. Força de Lorentz.

ABSTRACT

This work aims to describe the design, design and operational characteristics of a homopolar engine using physical experiments and simulation programs. The homopolar motor converts electrical energy into mechanical energy using Lorentz force, the torque of this force drives the homopolar motor forward. The aim of this study is to describe the design, design and operational characteristics of a homopolar engine, and the specific objective is to define and characterize the homopolar engine; and discuss the theoretical model in PSpice. A homopolar model was developed in the software in PSpice. Through experiments using various lubricants and a variation of reinforcements, it was possible to achieve maximum average speeds of 0.71m/s. Simulation in PSpice was able to predict the performance of the homopolar engine, including position and speed.

KEYWORDS: Homopolar motor. Simulation programs. Lorentz force.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo describir el diseño, diseño y características operativas de un motor homopolar utilizando experimentos físicos y programas de simulación. El motor homopolar convierte la energía eléctrica en energía mecánica utilizando la fuerza de Lorentz, el par de esta fuerza impulsa el motor homopolar hacia adelante. El objetivo de este estudio es describir el diseño, diseño y características operativas de un motor homopolar, y el objetivo específico es definir y caracterizar el motor homopolar; y discutir el modelo teórico en PSpice. Se desarrolló un modelo homopolar en el software de PSpice. A través de experimentos con varios lubricantes y una variación de refuerzos, fue posible alcanzar velocidades promedio máximas de 0,71 m / s. La simulación en PSpice fue capaz de predecir el rendimiento del motor homopolar, incluida la posición y la velocidad.

PALABRAS CLAVE: Motor homopolar. Programas de simulación. La fuerza de Lorentz.

¹ Universidade de Araraquara - UNIARA

² Prof. Me. do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara - Uniara



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

INTRODUÇÃO

Hans Christian Orsted, em 1821, descobriu o fenômeno do eletromagnetismo, e após tentativas sem sucesso de Humphry Davy e de William Hyde Wollaston, Michel Faraday (1791-1867), no século XIX, desenvolveu dois dispositivos denominando-os de “rotação eletromagnética”. Um desses é o Motor de Faraday ou Motor Homopolar (ausência de uma mudança de polaridade), também popularmente conhecido como “trem elétrico” ou “trem eletromagnético” (DOFF; SZMOSKI, 2016), o motor homopolar linear, tem como princípio a conversão da energia elétrica em energia mecânica, produz o movimento rotacional a partir do eletromagnetismo, e tornou-se o primeiro motor elétrico. Faraday demonstrou que um campo magnético cria uma corrente elétrica em um fio condutor, não sendo necessário estar conectado a uma fonte de energia, assim deduziu que com o movimento da bobina em relação a um ímã, obteria uma corrente elétrica contínua, ou seja indução eletromagnética (DOFF; SZMOSKI, 2016; SANTARELLI, 2007).

A demonstração do motor homopolar é simples, pois utiliza uma pilha, um ímã e o objeto que fecha o circuito para produzir energia mecânica na mesma proporção da corrente envolvida, do comprimento da armadura e do campo magnético (SANTARELLI, 2007).

Seu funcionamento, similar a maioria das máquinas eletromecânicas, é reversível, se o condutor gira mecanicamente, funciona como um gerador homopolar, produz tensão de corrente contínua entre os dois terminais do condutor. O baixo custo dos materiais, sua compatibilidade, além, de sua simplicidade, o torna atraente para uso em áreas sensíveis ao peso, fazendo-o ser utilizado em diversas aplicações, como exemplo: lançamento espacial, propulsão de navios e geração de energia para armas, dentre outras (ALVES, 2007; DOFF; SZMOSKI, 2016).

O objetivo deste estudo é descrever o desenho, *design* e características operacionais de um motor homopolar. Como objetivo específico busca-se definir e caracterizar o motor homopolar; e discorrer sobre o modelo teórico em PSpice.

A metodologia é de revisão bibliográfica e apresentação de estudo de caso trazendo resultados dos testes com vários dispositivos, diversos lubrificantes e modificações da armadura.

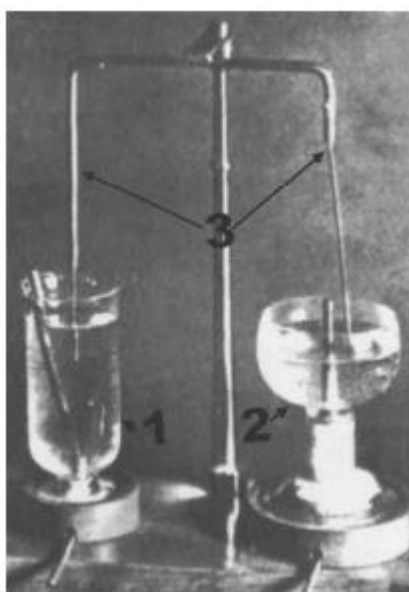
O estudo está dividido em cinco seções, sendo essa introdução, a revisão bibliográfica trazendo conceitos básicos de um motor homopolar, incluindo o modelo teórico em PSpice; na terceira seção apresenta o método da pesquisa, na sequência a apresentação do estudo de caso, descrevendo o arranjo experimental usado para testar o motor homopolar, incluindo a configuração geral e o equipamento usado para os procedimentos dos testes, os resultados obtidos em diferentes níveis para atingir a velocidade máxima do motor homopolar e na seção Discussão e resultados, traz as possíveis variáveis que podem afetar os resultados e conclusões no experimento. Finaliza com as considerações finais e referências que deram entendimento para redação do estudo.



1 ASPECTOS GERAIS SOBRE O MOTOR HOMOPOLAR

É a partir do eletromagnetismo que o motor homopolar produz movimento rotacional. O experimento de Faraday, em 1831, demonstrado no Royal Instituto de Londres, consistiu em um fio inserido em uma piscina de mercúrio e uma ímã dentro, conforme representa a figura 1. A corrente fornecida por uma bateria química, fazia com que o fio girasse em volta do ímã.

Figura 1 - Motor homopolar



Fonte: Projeto Harvard de Física, 1969 apud Marquez (2018, p. 24).

A figura 1 demonstra o experimento original executado por Faraday, no qual dois recipientes são preenchidos com mercúrio, no da esquerda uma barra metálica magnetizada (1) com apenas a sua ponta inferior fixada e o restante livre, permitindo girar em torno de uma haste fixa, na vertical superior (3), quando da passagem de corrente elétrica pela haste e pelo mercúrio. No outro recipiente (direita - 2), a barra metálica magnetizada permanece no fundo e uma haste metálica na vertical superior (3), mergulhada no mercúrio, com apenas a sua ponta de suspensão fixada, permitindo girar na passagem de corrente.

Para Doff e Szmoski (2016) o motor homopolar corresponde a uma demonstração simplificada da força de Lorentz, ou seja, uma corrente elétrica não paralela a um campo magnético produz um tipo de força induzindo a rotação do objeto em torno de um eixo, ou seja, um torque. Esse torque é proporcional ao produto cruzado do campo elétrico e do campo magnético, sendo a indução da força máxima quando dos dois campos perpendiculares entre si. Ocorre que, as cargas elétricas movimentam-se através do campo magnético perpendicular, a força de Lorentz gera uma força ortogonal à corrente no fio e ao campo magnético, levando a girar, impulsionando o dispositivo para



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

frente. Dmitrievskii *et al.*, (2021) citam a aplicação do motor em geradores de aeronaves e trens, inversores de soldagem e como motores de tração.

Um exemplo simples é o abrir de uma porta, ao realizar uma força, cuja componente perpendicular à porta faz com que ela gire em torno da dobradiça, o que corresponde a dizer que um torque resultante não nulo atua sobre um corpo, esse corpo passa a rotacionar (HELERBROCK, 2018).

A permanência da polaridade (homopolar) ocorre porque os ímãs em cada extremidade do motor são as mesmas, norte ou sul estão voltados para fora, e quando a carga elétrica se distancia da bateria em uma das extremidades e entra na outra, move-se em direções opostas em ambas as extremidades. Se houver inversão de um dos ímãs, ficando apenas uma polaridade direcionada para fora, permitirá que as forças no fio atuem na mesma direção. As baterias posicionadas na polarização normal (extremidades com orientações diferentes (norte para fora, sul para em direção oposta) faria a força de Lorentz contrair-se, passando a agir uma força em direção para cima do fio, e na outra extremidade direcionada para baixo (DOFF; SZMOSKI, 2016).

Na conversão de energia elétrica em mecânica, conceito principal do motor homopolar, ocorre uma proporcionalidade na quantidade de energia mecânica produzida com a da corrente envolvida, à força do campo magnético e ao comprimento da armadura, o que leva a afirmativa de Burres (2013) de que um disco condutor girando em um campo magnético ortogonal ao seu eixo provoca uma voltagem. Sendo que a tensão será proporcional a velocidade de rotação, força do campo e comprimento do condutor. A quantidade de voltagem gerada, é determinada pelo comprimento entre o eixo e um ponto no disco, havendo uma diferença de potencial de voltagem entre o centro e aborda externa do disco. A energia elétrica pode ser transferida para uma carga por meio de um contato deslizante, ou escova, na circunferência do disco.

Segundo Burres (2013), o dispositivo produz rotação eletromagnética e auxiliou na criação de base da tecnologia eletromagnética moderna. O motor homopolar tem seu uso em uma variedade de aplicações modernas e oferece benefícios como baixo custo de materiais e compactação, tornando-o atraente em aplicações sensíveis ao peso ou área.

Para Alves (2007), sua aplicação pode ser no acionamento elétrico direto para navios, para alimentar armas ou outros equipamento a bordo do navio possibilitando que grande quantidade de energia (na faixa MW) seja produzida em pequenos espaços, sendo que há possibilidade de substituir motores de turbina tradicionais por máquina ultraleve para aplicações aerotransportadas, ou seja, ainda o uso do motor homopolar ainda está sendo adaptado, podendo sua modelagem ser empregada para determinar velocidade, velocidade de rotação e posição com entradas variáveis.

1.1 Modelo Teórico

Esta seção apresenta as características elétricas e mecânicas do motor homopolar e descreve a simulação de computador do *software* PSpice OrCAD, usada para modelar o comportamento do motor homopolar.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

1.1.1 Teoria Mecânica

Como já descrito, o motor homopolar corresponde a um mecanismo ou dispositivo simples e barato que impulsiona, usando o torque fornecido pela força de Lorentz, e seu corpo principal é uma bateria com dois ímãs em cada extremidade (DOFF; SZMOSKI, 2016).

Doff e Szmoski (2016) apresentam em seu experimento baterias recarregáveis de níquel-hidreto metálico (NiMH), ímãs de neodímio de grau N52 de 1/4 de largura. As arruelas foram postas nas extremidades do aparelho possibilitando redução do atrito quando do motor estar impulsionando para a frente, sendo que um fio de cobre cria a armadura do motor. Executou o desgaste de um fio de cobre (que deve ser limpo para remoção de oxidação) para reduzir o atrito de contato, aumentando a área desse contato, levando a redução da resistência geral da armadura.

Quando um campo magnético é aplicado perpendicularmente à direção do fluxo da corrente, ocorre a força de Lorentz nas partículas carregadas, sendo essa força proporcional ao produto vetorial da corrente e a força do campo magnético. Apesar do campo magnético e da corrente não serem necessariamente perpendiculares, ambos são usualmente colocados em ângulos retos entre si para elevar ao máximo a força de Lorentz.

Na equação:

$$F = q (v \times B) \quad (1)$$

Onde:

F = força resultante (em Newtons)

q = carga elétrica da partícula (*Coulomb*) movendo-se com velocidade v

B = campo magnético (Tesla)

Tarasiuk (2009) simplificou tal equação, tendo em vista o campo magnético estar na direção axial do ímã e a corrente estar na direção radial, a carga flui ao longo da superfície do ímã para o fio, a direção da força ser perpendicular a ambos, uma vez que o produto cruzado de duas entidades perpendiculares será igual a seu produto. Assim, conforme demonstraram Doff e Szmosk (2016), a força de Lorentz é induzida em um condutor colocado em um campo magnético, e ao ocorrer o movimento de uma extremidade da bateria à outra pelo fio de cobre, esse atravessa o campo magnético. A força de Lorentz é induzida ao longo da malha elétrica onde a direção é perpendicular ao campo magnético, que é ortogonal a ambos, que por sua vez, produz um torque no fio, levando-o a girar e impulsionando todo aparelho para frente.

Irons (2015) demonstrou o funcionamento deste motor em um experimento no qual uma bateria AA com ímãs afixados em cada extremidade, corre ao redor do interior de uma bobina de fio.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

1.1.2 PSpice Modeling

Uma força (F) aplicada a uma armadura pode ser calculada multiplicando a corrente (I), a força do campo magnético (B) e o comprimento do fio no campo magnético (l) juntos:

$$F = IBl \quad (2)$$

A força calculada pode ser usada para encontrar a aceleração, velocidade e posição usando as seguintes equações:

$$F = ma \quad (3)$$

$$d = v_0t + \frac{1}{2}at^2 \quad (4)$$

$$v_f = v_0 + at \quad (5)$$

Onde:

m = massa total (quilogramas)

a = aceleração da massa (metros /segundo)

v_0 = velocidade inicial (metros / segundo)

v_f = velocidade final (metros / segundo),

d = deslocamento ou posição (metros)

t = tempo (segundos).

Barret (2002) preconiza que a velocidade e a posição são integrais de primeira e segunda ordem da aceleração, logo a força e massa são principais parâmetros para descrever o comportamento do motor. Portanto, o conhecimento das equações e dos parâmetros do sistema, é possível calcular a velocidade e a posição podem em qualquer momento.

Para modelagem do motor homopolar pode ser utilizado o PSpice OrCAD 15.7. Burress (2013) criou uma simulação utilizando o *software* PSpice para o modelo mecânico do motor homopolar. O modelo foi dividido em cinco seções principais: bateria, massa, inércia, posição e eficiência. Foram alterados diversos parâmetros, permitindo o uso da mesma simulação em diferente baterias, ímãs e armaduras. As variáveis encontradas puderam ser alteradas quando houve alteração nos testes, o que permitiu, ao utilizar uma varredura paramétrica, a determinação de uma combinação mais rápida. A avaliação da bateria em 2,5A-hora, tem o *adaptive burst mode* (ABM) à esquerda que determina se ainda há energia, O descarregamento da bateria a 2.5 A-hora ou mais, demonstra que a saída ABM é 0. Este valor retroalimenta a fonte de tensão controlada por corrente, e desliga-a quando da bateria



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

totalmente descarregada. No caso de ainda haver energia disponível, o ABM descarrega 1,2V, ou a capacidade nominal de uma bateria de níquel-hidreto metálico (BURRESS, 2013).

Uma bateria meio descarregada tem resistência interna de 40 mΩ. Quando de pouca energia, a resistência interna é muito alta. Uma estimativa de 5 Ω é usada para quando resta muito pouca energia (10% ou menos). O que é significativamente maior do que a resistência interna anterior, logo, comparando, a resistência é duas ordens de magnitude maior. Burress (2013) utilizou uma tabela para determinar a resistência interna com base na quantidade de energia da bateria ainda disponível na bateria. Essa tabela alimenta uma ABM que multiplica a resistência interna por um de dois valores, dependendo se a energia ainda está disponível na bateria. Quando descarregado, H5 teve uma entrada de 0 A, logo V (% IN2) também foi zero. Portanto, uma fonte de tensão produz uma tensão proporcional ao produto da resistência interna e da tensão da bateria. A resistência do fio é a resistência medida da armadura. A resistência de contato deve ser alterada dependendo do tipo de armadura e lubrificante usado. Para a armadura de cobre desgastada sem qualquer lubrificação, a resistência do fio é 0,5 Ω e a resistência de contato é 0,75 Ω. (BURRESS, 2013).

Kusko e Peeran (1988) afirmaram que o conhecimento do raio e a largura permite encontrar o peso de qualquer ímã de neodímio. A equação abaixo permite calcular o peso total dos ímãs a serem usados no motor homopolar. Dados o raio e a largura de um ímã, o volume do ímã pode ser calculado em metros cúbicos, o valor é multiplicado pela densidade do ímã para encontrar o peso total. Para o tipo de ímã escolhido, a densidade é 7500 kg /m³. Este número é determinado usando a massa dada de 6,03 gramas para um ímã com raio e largura de 0,635 cm:

$$6,03 \text{ gramas} = k * V = k (\pi r^2 w) \quad (6)$$

$$6,03 \text{ gramas} = k * 3,14 * 0,635 \text{ cm}^2 * 0,635 \text{ cm} \quad k = 7.500.000 \text{ g/cm}^3 = 7500 \text{ kg / m}^3$$

Segundo experimento de Kusko e Peeran (1988), ocorre uma relação direta entre as leis do movimento para o movimento linear e angular. Desta forma, é possível encontrar a posição rotacional tomando a integral da velocidade rotacional como posição linear utilizando a velocidade linear. Dividindo a velocidade posicional pela circunferência das arruelas encontra-se a velocidade rotacional. Quanto a velocidade máxima, busca-se que a eficiência translacional seja a maior possível.

2 MÉTODO DA PESQUISA

Este é um estudo de revisão bibliográfica, que tem como método a aplicação de um estudo de caso. Sobre a metodologia, é possível afirmar que oferece subsídios para o entendimento do tema, possibilitando aprendizado mais profundo para desenvolvimento do estudo de caso. O estudo de caso, segundo descreve Praça (2015), possibilita avaliar tecnicamente e profundamente um ou poucos objetos de pesquisa.

A proposta deste estudo é demonstrar o desenvolvimento de um modelo eletromecânico do motor, possibilitando prever seu comportamento ao longo de um período de tempo sob uma variedade



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

de condições. As simulações do PSpice são comparadas aos resultados dos testes experimentais para garantir a precisão.

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 Dispositivos experimentais

Os dispositivos utilizados neste estudo para testar o motor homopolar são: uma bateria recarregável, ímãs de neodímio, duas arruelas, um fio condutor não magnético e um trilho de dez metros de comprimento. Os dados foram processados para encontrar a velocidade e a posição do aparelho em intervalo de um metro ao longo de uma pista, e cada item será discutido, demonstrando sua finalidade e parâmetros físicos.

A condução do experimento busca comparar a precisão da simulação PSpice com resultados físicos numa distância de dez metros. Os motores homopolares foram construídos utilizando quatro baterias de hidreto metálico de níquel (totalmente carregadas antes de cada execução), utilizando cada uma delas três vezes durante o teste de uma nova armadura ou lubrificante. Segundo afirmativa de Faria Neto *et al.*, (2013, p. 37) “O ciclo de carga/descarga pode ser repetido até que a capacidade de armazenamento se deteriore e fique abaixo de um nível mínimo considerado razoável.”

Os lubrificantes são: água da torneira; água salgada - criada mexendo lentamente o sal em um recipiente com água até que a solução saturasse; água com sabão - criada combinando uma quantidade igual de água e sabão; e óleo mineral - não diluído como os outros lubrificantes. As armaduras utilizadas foram: fio de cobre folheado, fio seco, fio de solda; fio de cobre seco e desgastado.

O experimento foi dividido em dois grupos com base na lubrificação ou no material da armadura, e apesar de ambos os grupos serem conduzidos usando bateria, arruelas e ímãs, a resistência de contato é diferente por causa do lubrificante escolhido ou material da armadura, conforme previsto por Kusko e Perran (1988).

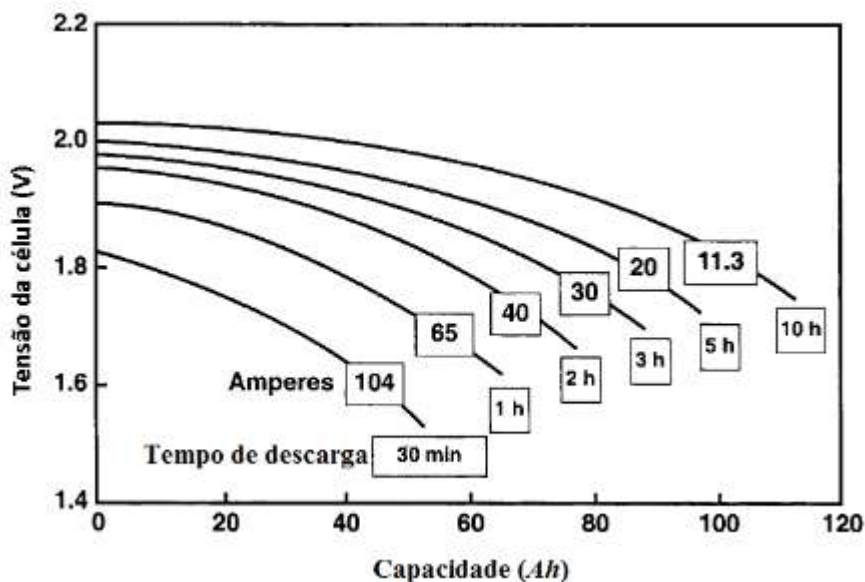
A bateria selecionada é do tipo Energizer NH15-2500, recarregável e contém um sistema químico de níquel-hidreto metálico (NiMH). Tem uma nominal de 1,2 volts e uma capacidade nominal de 2500 mAh em temperatura ambiente (70° F) com base em uma taxa de descarga contínua de 500 mA a 1,0 volts. Sua resistência interna é de 30 mΩ quando totalmente carregada e 40 mΩ quando a célula está meio descarregada. A dimensão física, conforme ficha técnica, é de um diâmetro de 14,5 mm, comprimento de 50,5 mm e peso de 30 gramas. Os pesos reais medidos das baterias são ligeiramente mais leves do que o peso típico dado na folha de parâmetros que é de 30 gramas. A escolha deste tipo de bateria (níquel-hidreto metálico) se deu por fornecer uma corrente mais consistente enquanto descarrega, quando comparadas com baterias alcalinas e de lítio. Na figura 3 é possível observar a taxa de descarga da bateria do Energizer.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

Figura 3: Curvas de descarga da bateria de níquel-hidreto metálico Energizer

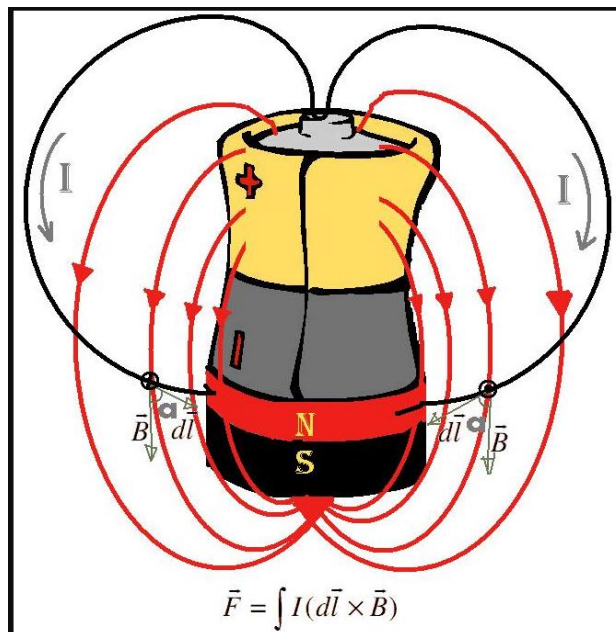


Fonte: Faria Neto *et al.* (2013, p. 41).

Os ímãs, no total de quatro, são usados em todos os experimentos, são de neodímio de grau N52 com diâmetro de $\frac{1}{2}$ e largura de $\frac{1}{4}$, tem o corpo de NdFeB revestido com uma placa de níquel pesando 6,03 gramas cada. O peso total real medido de dois ímãs é de 26,77 gramas e 26,34 gramas para cada lado respectivo. Foram escolhidos pela resistência e revestimento de níquel, e condução de eletricidade, que o deslizamento do fio ao longo da superfície. São ímãs de maior qualidade do fabricante. Tem diâmetro maior que o diâmetro da bateria, permitindo espaço para que a escova mantenha contato com a circunferência do ímã, impedindo o maior momento de inércia causado por um ímã de diâmetro maior.

A figura 4 apresenta o esquema do campo magnético do motor homopolar. A bateria metálica possibilita que o campo magnético viaje através dela, assim como ao seu redor pela parte externa.

Figura 4: Campo magnético de um motor homopolar. O campo magnético se estende até a bateria por causa de seu invólucro metálico



Fonte: Moro (2009, p. 1).

O campo magnético foi medido por um teslômetro, sendo que sua intensidade é proporcional à distância do ímã. Neste experimento, o campo magnético é medido a meio caminho entre o ímã e o ponto de contato no piso da armadura, e o resultado é inserido em uma tabela de parâmetros da simulação PSpice.

As arruelas são posicionadas nas extremidades dos ímãs reduzindo o atrito de contato, esse dispositivo assegura que as arruelas fiquem no lugar, e como o diâmetro das arruelas é maior que o dos ímãs e da bateria, a resistência de contato é reduzida porque tanto ímãs quanto bateria não tem contato com o trilho.

O dispositivo armadura, corresponde a um fio condutor não magnético, que por sua vez, faz contato com a circunferência de ambos os ímãs, ligando a extremidade do ânodo e do cátodo da bateria através dos ímãs e fio. No experimento com lubrificante, a composição da armadura é um fio de cobre desgastado, mergulhado em uma variedade de líquidos. Os experimentos consistem em armaduras de diferentes materiais, incluindo placas de níquel *pepper* e solda.

O último dispositivo, corresponde a uma pista de dez metros construída em uma superfície plana, que é marcada em intervalos de um metro com fita crepe. Esses marcadores foram usados para ajudar a determinar a velocidade do motor homopolar.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

3.2 Experimento físico

Os experimentos têm por objetivo comparar a precisão da simulação PSPICE com os resultados físicos. Foram utilizados quatro motores homopolar e uma única bateria de níquel-hidreto metálico e um fio condutor para conduzir cada teste. No total quatro baterias foram utilizadas, cada uma delas por três vezes durante o teste de uma nova armadura ou lubrificante. Todas foram carregadas antes de cada experimento e recarregadas antes da segunda e da terceira tentativa para cada nova armadura e lubrificante.

Os experimentos foram divididos em dois grupos: um para cada teste do lubrificante e outro para testar a armadura. No primeiro grupo utilizou-se um fio de cobre seco e desgastado, uma bateria recarregável de níquel-hidreto metálico, dois ímãs de neodímio e duas arruelas, e o lubrificante. O segundo grupo utilizando os mesmo dispositivos, porém as armaduras de materiais diferentes substituíram do fio de cobre.

Para cada tipo (lubrificante ou armadura) foram conduzidos três testes. O segundo teste teve o aparelho em funcionamento da marca de zero a dez metros na pista., assim como o terceiro teste consistiu no dispositivo passando da marca de dez a zero metros para as quatro baterias. O primeiro teste tem a direção de deslocamento alternado em cada bateria, desta forma, qualquer variação do nível da pista foi contabilizada pela média dos resultados.

3.2.1 Experimento com lubrificantes

Neste teste o motor homopolar foi impulsionado por uma armadura seca (fio de cobre desgastado). O mesmo fio foi utilizado nos demais testes, com os vários lubrificantes (água da torneira; água salgada; água com sabão; óleo mineral). A oxidação do cobre, em exposição ao ar, requer a limpeza da armadura para cada experimento, antes do uso da bateria carregada. Para essa limpeza utilizou-se uma solução de ácido clorídrico (HCl) a 5% aplicada aos contatos do fio usando um aplicador q-tip, que é usado para raspar levemente as pontas da armadura removendo qualquer resíduo de oxidação. Na sequência, após retirada da solução com água da torneira, a armadura foi enxuta com pano. A mesma solução (HCl) a 5% foi utilizada nos testes lubrificante diferentes (água da torneira, sal e água com sabão, óleo mineral).

Para a limpeza pode ser utilizado, na falta de HCL um solução mais forte, assim, no teste seco, sem lubrificante utilizou-se uma solução de HCl a 37% como agente de limpeza no cobre oxidado. Após limpeza do fio de cobre as pontas das armaduras foram inseridas no lubrificante. Cada lubrificante foi disposto em recipientes reutilizados para cada bateria nova do experimento, encorajando a uniformidade em cada teste.



3.2.2 Modificações de Armadura

Uma vez que os lubrificantes não aceleram excessivamente o dispositivo, diferentes materiais e formas são usados para variar a armadura. Essas modificações foram testadas para tentar maximizar a velocidade do motor homopolar.

O primeiro teste foi a seco antes de o experimento ser conduzido. Para cada fio seco não foi aplicado lubrificante à armadura ou corpo do dispositivo. A limpeza da oxidação, no caso do uso do fio de cobre, foi com solução de HCl a 37% e água da torneira.

No primeiro teste com armaduras diferentes utilizou-se um fio de cobre desgastado semelhante às armaduras de cobre anteriores, tendo um laço adicional, forma esta que usa o *loop* esperando o dobro da corrente através do caminho magnético, garantindo o dobro da força de Lorentz atuando no dispositivo. Logo, a mesma quantidade de intensidade de corrente e campo magnético pode produzir uma velocidade mais rápida.

O fio de cobre folheado a níquel também é utilizado para construir uma armadura, ou seja, um pedaço de trança plana de cobre com $\frac{1}{4}$ de largura e uma fina camada de níquel sobre ela. Apesar do níquel ter resistência maior do que o cobre, apresenta a vantagem de resistir à oxidação, assim, não requer o uso da solução de HCl para limpeza da armadura antes do teste. Como o revestimento de níquel é fino, a expectativa é de que a resistência adicional não tenha grande impacto na resistência geral da armadura. Porém, uma vez que a resistividade do cobre ao longo desse comprimento é significativamente baixa, o níquel adicionou uma grande resistividade a ele.

Utilizando um único fio de solda usado para o material da armadura. O primeiro tipo de solda não foi bem-sucedido para esta aplicação. Ao testar o motor homopolar usando a armadura de solda, o primeiro experimento foi conduzido com a bateria nº 1 e uma solda de 0,031 polegadas de diâmetro com núcleo de colofônia padrão consistindo de chumbo e estanho. Foi um teste inconclusivo. Inicialmente o motor parecia viajar rápido nos primeiros metros, porém, desacelerou rapidamente, quase não completando a corrida de 10 metros. Na recuperação do motor foi verificado que a armadura havia quebrado. Isso se deu por conta de a temperatura de fusão da solda ser baixa (aproximadamente 373°F), com o calor causado pela condução de uma grande quantidade de corrente em combinação com a força de Lorentz ocorreu sua quebra. Essa ocorrência levou ao uso de uma solda de maior diâmetro.

Em seguida, uma solda de 0,062 polegadas com núcleo de colofônia padrão foi moldada para formar a armadura. Os testes deste novo fio foram ótimos em comparação com os experimentos anteriores. A esse respeito, Tarasiuk (2009) afirma que a bateria é capaz de completar a pista de corrida de 10m em 10,8 segundos. Desta forma, a solda demonstrou-se um material viável para uma armadura, e os experimentos subsequentes foram conduzidos e registrados.



DISCUSSÃO E RESULTADOS

Algumas variáveis podem afetar os resultados e conclusões, como por exemplo, cada execução parece ser mais rápida quando as baterias são carregadas recentemente, ou seja, quando da remoção das baterias após conclusão do processo de recarga, parecem capazes de expelir a corrente com mais rapidez. A temperatura mais alta parece ter efeito positivo na capacidade de descarga e, as baterias apresentam temperatura mais quente quando do carregamento, fazendo com que o calor adicional acelere a reação química que produz a corrente. A esse respeito, Faria Neto *et al.*, (2013, p. 41) ressaltaram “[...] que a capacidade de armazenamento depende de vários fatores, entre eles a temperatura ambiente, o histórico de cargas/descargas da célula e da taxa de descarga, ou seja, quanto maior a taxa de descarga empregada menor a capacidade de armazenamento.” Quando as baterias são carregadas durante a noite, mesmo tendo sido totalmente carregadas, o tempo pode auxiliar a retomada da temperatura ambiente, esse também foi um dos achados do experimento de Doff e Szmoski (2016).

Os condutores tornam-se mais resistentes quando a temperatura aumenta. As armaduras de solda e cobre aqueceram quando parte da energia da bateria foi expelida como energia térmica. Desta forma, os teste subsequentes ficaram mais lentos, por conta do aquecimento do fio, logo, menos condutor, porém efeito este mínimo, sendo desconsiderado.

A poeira metálica ou pequenos recheio metálicos mostraram-se fontes de erro. O ímã exerce atração com essa peças metálicas do solo sobre o qual está rolando, e quando presas a estes ímãs a superfície deixa de ser lisa podendo interromper o contato da armadura, além de que, se alguma peça permanece entre o ímã e a bateria, ocorre a perda de nivelamento, impedindo o aparelho de rolar, podendo ocasionar oscilação.

Por fim, com as diferentes intensidade de solução HC1, utilizadas na limpeza do fio de cobre (ora a solução HCL a 5% - com lubrificantes, e ora a 37% a seco) constatou-se que a solução mais forte foi capaz de remover a oxidação, porém, causando risco de descascar parte do cobre.

A simulação PSpice exibiu resultados precisos mesmo quando das alterações nas condições experimentais. Similar a este estudo, Doff e Szmoski (2016) afirmaram que a alteração de algumas variáveis na tabela de parâmetros e uma extensa gama de condições de teste pode ser simulada usando o modelo, variáveis essas que incluem o tamanho e a massa do ímã, arruelas e baterias, intensidade do campo magnético, comprimento da armadura e o número total de ímãs usados.

Com os parâmetro de tamanho do ímã foi calculada a massa, automaticamente, para um ímã de neodímio que tem em um corpo NdFeB, se outro material for utilizado a densidade da tabela de parâmetros requer alteração. Nos diferentes lubrificantes e materiais de armadura a resistência de contato deve ser alterada no modelo. O controle dessas variáveis permite previsões sobre o comportamento de um moto homopolar, e essas podem ser feitas conforme o comportamento do motor, além de permitir precisão com base nos dados físicos obtidos. Desta forma, a simulação PSpice



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

modelou com sucesso as propriedades eletromecânicas do motor homopolar e foi capaz de prever seu comportamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse Projeto teve por objetivo descrever o desenho, o *design* e as características operacionais de um motor homopolar, adotando experimentos físicos e programas de simulação.

Com base nos resultados, é possível concluir que a energia térmica promove melhora no desempenho da armadura de solda, entretanto, a flexibilidade da solda junto ao calor permitiu a adaptação da solda ao formato dos ímãs, criando uma superfície de contato maior e com isso a armadura teve menor probabilidade de interromper momentaneamente o contato com o ímã.

Ao utilizar diferentes armaduras e lubrificantes, foi possível atingir as velocidades médias máximas de 0,71 m/s. Por fim, pode ser analisado que o modelo eletromecânico do motor homopolar desenvolvido em PSpice foi o elemento-chave para a construção da conclusão do referido trabalho. Vale dizer que a simulação foi utilizada com enfoque principal de mensurar o desempenho do motor homopolar, incluindo posição e velocidade. Através desse processo, pode-se concluir que os resultados medidos pelo motor e os previstos por simulação de computador apresentam conformidade aos comparados e apresentados no transcrito desse texto.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. N. **Propulsão elétrica de navios**. Orientador: Edson Hirokazu Watanabe. 2007. 180f. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2007-1/2007102901-2007102901/file> Access: 20 set. 2022.

BARRET, P. **Machines électriques**: Théorie et mise en oeuvre. Paris: Elipses, 2002.

BASSHAM, B. A. **An Evaluation of Electric Motors for Ship Propulsion**. Advisor: Robert Ashton. 2009. 118 f. Dissertation (Master of Science in Electrical Engineering) - Naval Postgraduate School (NPS), Monterey, California, USA, 2009. Available: <https://core.ac.uk/download/36694766.pdf> Access: 20 set. 2022.

BURRES, Tim. **Benchmarking State-of-the-art Technologies**. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2013. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ape006_burres_2013_o.pdf Access: 20 set. 2022.

DMITRIEVSKII, V.; PRAKHT, V.; ANUCHIN, A.; KAZAKBAEV, V. Design optimization of a traction synchronous homopolar motor. **Mathematics**, Basel, Switzerland, v. 9, n. 12, p. 1-12, 2021. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/9/12/1352> Access: 20 set. 2022.

DOFF, A.; SZMOSKI, R. M. A descrição do funcionamento de um motor Homopolar linear e suas aplicações: Ilustrando o funcionamento de um acelerador de partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. e2311, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/rbep/a/VXW6TW3qwPFLFNKh3bf8CCd/?format=pdf&lang=pt> Access: 20 set. 2022.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR HOMOPOLAR LINEAR
E SUAS APLICAÇÕES NO CONTEXTO DA ENGENHARIA ELÉTRICA
Luiz Gustavo da Silva, Antonio Pinto do Nascimento Neto

FARIA NETO, A.; LOTUFO, F. A.; MESQUITA, L.; COELHO, A. P. C. Introdução ao armazenamento eletroquímico de energia: uma abordagem didática. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, SP, v. 19 n. 2, p. 36-46, 2013. Disponível em: <http://periodicos.unitau.br/ojs/index.php/exatas/article/view/1927/1327> Acesso em: 28 set. 2022.

HELERBROCK, R. Torque. **Brasil Escola**, 2018. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/torque-uma-forca.htm> Acesso em: 6 set. 2022.

IRONS, S. Lecturer / Manager Instructional Labs. **The Physics Teacher**, Yale, v. 53, p. 186-188, 2015. Available: <https://physics.yale.edu/news/stephen-irons-lecturer-manager-instructional-labs-published-physics-teacher-vol-53-march-2015> Access: 20 set. 2022.

KUSKO, A.; PEERAN, S. M. Definition of the brushless DC motor. *In*: Engineering conference record of the 1988. IEEE industry applications society annual meeting, USA. 1988 [**Proceeding...**] USA, IEEE, 1988. v. 35, n. 6, p. 20-22. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/25036> Access: 20 set. 2022.

MARQUES, L. V. **Uma abordagem histórica da indução eletromagnética para o ensino fundamental os experimentos do disco de Faraday e do motor homopolar**. Orientador: Antony Marco Mota Polito. 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Sociedade Brasileira de física, Brasília, DF, 2018. Disponível em: 2018. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/33238/2/2018_Leth%C3%ADciaVieiraMarques_PRODUTO.pdf. Acesso em: 6 set. 2022.

MORO, J. Z. Motor homopolar. **Blog Volta Ampere**, 2009. Disponível em: <http://voltampere.blogspot.com/2009/11/o-motor-homopolar.html> Acesso em: 30 set. 2022.

PRAÇA, F. S. G. Metodologia da pesquisa científica: organização estrutural e os desafios para redigir o trabalho de conclusão. **Revista Eletrônica "Diálogos Acadêmicos"**, Fortaleza/CE, v. 8, n. 1, p. 72-87, jan./jul, 2015. Disponível em: <http://uniesp.edu.br/sites/biblioteca/revistas/20170627112856.pdf> Acesso em: 12 set. 2022.

SANTARELLI, R. **Motor de Faraday**. 2007. TCC (Relatório Final) - Instituto de Física Gleb Wataghin - UNICAMP, Campinas, 2007. Disponível em: https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2007/RaphaelS-Saa_F609_RF2.pdf Acesso: 20 set. 2022.

TARASIUK, T. A few remarks about assessment methods of electric power quality on ships — present state and further development. **Measurement**, Perugia, Italy, v. 4, n. 8, p. 1153-1163, 2009. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224108000304> Access: 20 set. 2022.