

Desenvolvimento e análise de um Protótipo Coilgun

Design and analysis of a Coilgun Prototype

Marcelo B. Perotoni*, Mateus Mergl

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC,
Santo André, SP, Brasil

Recebido em 9 de dezembro de 2015. Aceito em 17 de janeiro de 2016

O artigo descreve a construção e modelagem simples de um protótipo de pequenas dimensões de um Coilgun – arma eletromagnética que dispara um projétil metálico cuja operação se assemelha aos motores elétricos lineares, que também acionam fechaduras magnéticas e atuadores. O projeto apresenta baixo custo, envolve construção com elementos facilmente encontráveis contudo envolve conceitos relativamente sofisticados de eletromagnetismo. O sistema pode ser empregado para estudos de física e também motores elétricos lineares, em Engenharia. O artigo discute modelos circuitais, análise da força magnética exercida no projétil e figuras do campo produzido a partir de um simulador eletromagnético. A instrumentação usada para medida da velocidade também é apresentada, com dados de medidas.

Palavras-chave: eletromagnetismo aplicado, instrumentação eletrônica.

The article describes the construction and simplified analysis of a small-scale Coilgun prototype – electromagnetic weapon that launches a metallic slug whose operation is similar to linear electric motors, also seen in magnetic locks. The design can be constructed with low cost and easily available components, though it involves sophisticated electromagnetism concepts. The system can be employed to Laboratory experiments on Physics as well as on Engineering, to address Electromagnetic Conversion of Energy, namely linear electric motors and actuators. The article discusses circuit models, the electromagnetic force on the slug and also field plots generated from a commercial simulator. The used instrumentation for velocity measurement is also presented, alongside with measured data.

Keywords: Applied Electromagnetics, electronic instrumentation.

1. Introdução

Coilguns são estruturas que operam – como aponta o nome – a partir do efeito de movimento mecânico (“gun”) a partir de uma bobina (“coil”), conforme apresenta a figura 1. Um pulso de corrente de alta intensidade gera um campo magnético no interior de uma bobina linear (solenóide). Havendo um objeto metálico no seu interior, correntes são induzidas no mesmo, e devido ao efeito das forças de Lorentz ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$) ocorre uma aceleração [1]. Coilguns podem ser classificados como motores lineares homopolares ou heteropolares, dependendo do sentido do campo magnético [2]. O projétil comporta-se como a armadura, e a bobina é encarada como estator na terminologia usual de motores elétricos.

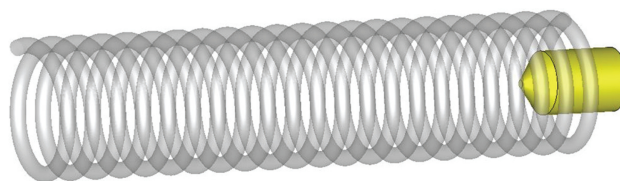


Figura 1: Ilustração dos elementos do Coilgun – bobina e projétil.

A energia cinética do projétil, que o acelera a partir do repouso, provém da descarga rápida de um pulso de corrente no indutor. Usualmente, condensadores de altas capacitâncias e voltagens nominais são carregados com uma tensão DC (*Direct Current*, corrente contínua) por uma fonte de alta tensão e são rapidamente chaveados no indutor.

*Endereço de correspondência: mperoconsult@gmail.com.

Coilguns possuem aplicações como armamento na área de defesa, como, por exemplo, acionando motores eletromagnéticos [3] a serem embarcados em veículos de combate. A não necessidade de explosivos para propulsão traz maior segurança à operação, além de maior precisão e repetibilidade em função da instrumentação mais simples, em contraste com sistemas tradicionais baseados em explosivos. Outra aplicação seria o uso para disparo de mísseis [4, 5], microsatélites [6] e mesmo veículos para exploração espacial [7] [8]. Na área de nanocompósitos, Coilguns foram empregados para testes balísticos em tecidos a prova de balas, baseados em Kevlar [9].

Assim que o projétil cruza o meio da bobina a força devido à interação magnética muda sua orientação, em vez de acelerar o efeito é de frenagem. Assim para que a velocidade de escape do projétil seja maximizada (i.e. que o máximo da energia eletrostática armazenada no capacitor se transforme em energia cinética) é necessário que não haja corrente circulando na bobina quando o projétil cruza a metade do comprimento do estator. Trata-se de um problema complexo, pois envolve materiais magnéticos cujas características dificilmente são totalmente conhecidas (curva de histerese). Além disso, uma vez que há movimento envolvido, simulações computacionais estáticas tem que levar em consideração estados anteriores.

O artigo trata de de um Coilgun e sua instrumentação associada para medida de velocidade, com tópicos cobrindo o modelo circuital e a respectiva expressão simplificada para a força exercida no projétil (justificando o fato de que a força passa a ser de frenagem após passado o ponto médio da bobina). Simulações estáticas mostram figuras da densidade de corrente computada no sistema, e medições de velocidade apontam os pontos ótimos para máxima velocidade de escape no protótipo construído.

2. Modelo circuital

O Coilgun pode ser visualizado como um circuito RLC (fig. 2), onde o capacitor encontra-se carregado com uma tensão (condição inicial), e o conjunto estator-armadura é representado por um indutor com uma resistência representando as perdas por efeito Joule. Ambas estruturas estão acopladas magneticamente, efeito representado pelo fator M (indutância mútua). Na realidade a bobina ou estator apresenta em seus terminais uma indutância variável

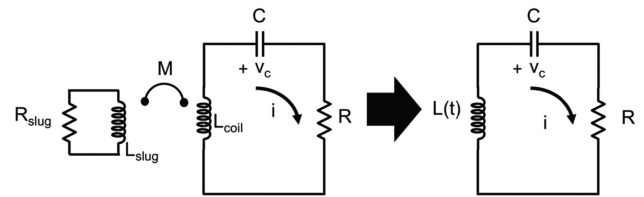


Figura 2: Representação de circuito do Coilgun; a esquerda o efeito da indutância mutual e a direita a indutância total é representada por um indutor cujo valor é variante no tempo.

no tempo, uma vez que ao ser acelerado o projétil ocupa posições diferentes no núcleo. Esse efeito de variação temporal da indutância, para efeitos de simplificação, é desprezado.

A equação do circuito é a de um circuito RLC sem fonte, com as condições iniciais de $V_c(0)=V_0$ (tensão no capacitor) e $i(0) = 0$:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L(t)} \frac{di}{dt} + \frac{i}{L(t)C} = 0 \quad (1)$$

Para efeitos de simplificação, a característica variante no tempo de L é desprezada. O fator de amortecimento α e a frequência de oscilação natural ω_o são definidos respectivamente como:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (2)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Para o caso particular sobreamortecido (onde $\alpha > \omega_o$) a solução para a equação diferencial pode ser escrita como:

$$i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad (4)$$

Onde os fatores s_1 e s_2 são definidos como:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_o^2} \quad (5)$$

As constantes A_1 e A_2 são encontradas a partir das condições iniciais do problema. Para esse caso, a corrente em $t = 0$ é zero (resultando em $A_1 = -A_2$). Sendo considerada a tensão inicial no capacitor V_0 é possível escrever a tensão no capacitor como:

$$v_c(0) = \frac{1}{C} \int^i dt = V_0 \quad (6)$$

Escrevendo a queda de tensão ao longo da malha em $t = 0$:

$$Ri(0) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} + V_0 = 0 \quad (7)$$

Substituindo a derivada da corrente avaliada em $t = 0$ resulta em:

$$Ri(0) + L(A_1s_1 - A_1s_2) + V_0 = 0 \quad (8)$$

A corrente em $t = 0$ é nula, assim a constante A_1 pode ser escrita como:

$$A_1 = \frac{V_0}{L(s_2 - s_1)} \quad (9)$$

De maneira que resulta na expressão:

$$i(t) = \frac{V_0}{L(s_2 - s_1)} [e^{s_1t} - e^{s_2t}] \quad (10)$$

A máxima energia cinética E_E disponível para ser transferida ao projétil é proveniente da energia eletrostática armazenada no capacitor C , carregado com tensão V :

$$E_E = \frac{1}{2}CV^2 \quad (11)$$

A equação 11 mostra que a energia aumenta com o quadrado da tensão de alimentação, e apenas linearmente com o valor da capacitância. Assim é preferível operar com maiores tensões a valores altos de capacitores. Naturalmente fontes que forneçam tensões elevadas são razoavelmente custosas, e o uso dessas tensões impõe restrições nos componentes usados, particularmente chaves e interruptores.

A energia cinética E_C pode ser calculada a partir da velocidade de escape v_e do projétil e de sua massa m .

$$E_C = \frac{1}{2}mv_e^2 \quad (12)$$

A eficiência do sistema pode ser descrita como a razão entre as energias cinéticas e eletrostáticas:

$$\eta = \frac{E_C}{E_E} = \frac{m}{C} \left(\frac{v_e}{V} \right)^2 \quad (13)$$

3. Expressão da força devido ao campo magnético

A força exercida no projétil é proporcional à derivada com campo magnético, e não a sua magnitude [10]. A força de Lorentz exercida no projétil pode ser escrita como [11],

$$F = J \times B \quad (14)$$

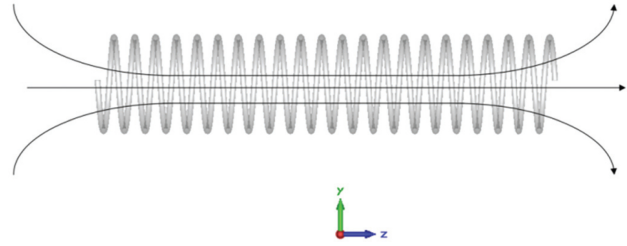


Figura 3: Arte do vetor indução magnética (B) em um solenóide alinhado com o eixo z .

Onde J é o vetor densidade de corrente no projétil e B o vetor indução magnética, causado pelo solenóide. A equação de Faraday (com o termo da corrente de deslocamento adicionado por Maxwell posteriormente) a seguir permite obter uma expressão para a densidade de corrente:

$$\nabla \times B = \mu \left[J + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right] \quad (15)$$

Sendo ε e μ respectivamente a permissividade elétrica e permeabilidade magnética. Substituindo J de 15 em 14 resulta em:

$$F = \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times B - \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right] \times B \quad (16)$$

Desprezando o efeito da força causado pelo campo elétrico pode-se expressar a equação anterior como:

$$F = \frac{1}{\mu} [\nabla \times B] \times B \quad (17)$$

Usando a propriedade de cálculo:

$$[\nabla \times B] \times B = \nabla (B \bullet B) - (\nabla \bullet B) B \quad (18)$$

O divergente do campo B é nulo, de acordo com a Lei de Gauss (devido a não existência de fontes ou sorvedouros de campo magnético, ou monopolos magnéticos), logo a força F pode ser expressa como relacionada diretamente ao operador Laplaciano do vetor B :

$$F = \frac{1}{\mu} \nabla (B \bullet B) = \frac{1}{\mu} (\nabla |B|^2) \quad (19)$$

Considerando a solenóide orientado com eixo ao longo da direção z (figura 3), o vetor B dentro da estrutura estará majoritariamente alinhado nessa mesma direção. Utilizando coordenadas cilíndricas haverá uma componente B_r e outra B_z .

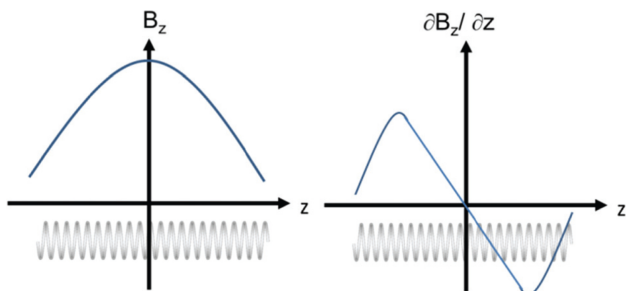


Figura 4: Magnitude do vetor \mathbf{B} ao longo da bobina e sua derivada (proporcional à força exercida no projétil). Figura meramente ilustrativa, para análise qualitativa.

$$F = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial}{\partial r} [B_r^2 + B_z^2] \right) r'' \quad (20)$$

Considerando que no interior da bobina há apenas a componente B_z a equação se simplifica da forma:

$$F = \frac{1}{\mu} (2B_z \frac{\partial}{\partial z} [B_z]) z'' \quad (21)$$

O resultado mostra que embora a magnitude do campo seja máxima no meio geométrico da bobina a força exercida no projétil não o é. Além disso, a força exercida pelo campo magnético no projétil muda de direção após a metade do comprimento da bobina. A figura 4 apresenta de maneira qualitativa ambas grandezas – o campo e sua derivada. A maximização da velocidade de escape do projétil passa principalmente por evitar que ele atravesse o meio da bobina enquanto a mesma estiver energizada, para evitar a força de frenagem. Isso pode ser obtido ou através de uma bobina mais comprida ou via capacitâncias menores, que produzam pulsos de corrente mais curtos no tempo.

4. Simulações de campo eletromagnético

A simulação eletromagnética completa do sistema apresenta dificuldades uma vez que há a dependência temporal na resposta, i.e., as diferentes posições do projétil dependem das posições anteriores e da corrente instantânea que circula na bobina. Ou seja, o movimento temporal do projétil deveria ser levado em consideração, configurando um típico problema de simulação acoplada (por exemplo avaliação circuital e eletromagnética atuando em conjunto).

Além do problema associado ao movimento, a correta avaliação da força no projétil depende também de caracterização precisa do material – sua

permeabilidade magnética. Metais comumente encontrados em laboratórios e oficinas possuem permeabilidades que podem variar algumas ordens de grandeza, assim a simulação, para produzir resultados satisfatórios, deveria ser precedida pela medida laboratorial da permeabilidade complexa do material do projétil.

Um modelo computacional foi modelado dentro do pacote CST EM Studio®[12], de acordo com as dimensões do protótipo efetivamente construído (apresentado na figura 6). O pacote emprega o Método de Elementos Finitos [13]. A figura 5 apresenta um detalhe da malha tetraédrica empregada pelo simulador, bem como a amplitude do campo para diferentes posições do projétil. O material do projétil foi considerado como tendo permeabilidade relativa de 100, sem perdas (parte imaginária nula), e a corrente circulando na bobina assumida como sendo 1 A. Pode ser visualizada que a maior densidade de corrente situa-se espacialmente nos extremos do projétil.

Na figura 5 percebe-se também que quando o projétil encontra-se no meio geométrico da bobina (frame superior) a densidade de corrente encontra-se distribuída de maneira simétrica no projétil – configurando ser essa a posição de repouso, onde as forças de aceleração e frenagem se equivalem.

5. Protótipo: medidas

Um sistema teste foi montado (fig. 6), com opções de capacitores de 10 mF e 3 mF, suportando tensões nominais de 250 V. A bobina possui uma indutância de 384 μH (medida sem projétil), com resistência associada de 1,22 Ω (400 espiras de fio esmaltado com diâmetro 0,5 mm). A tabela I apresenta as características do circuito RLC obtido. O projétil apresentado na figura foi obtido a partir de um prego de aço, tendo sido serrado para que atingisse as dimensões dadas.

A fig. 7 apresenta a simulação do circuito para as duas condições de capacitância, realizadas no software CST Design Studio™[12], com a forma de onda da corrente circulante na malha.

A partir da figura 7 é possível perceber que a capacitância maior (10 mF) produz um pulso com tempo de duração maior, resultando em um campo magnético na bobina que persiste após o projétil ter atingido o ponto médio do solenóide. Naturalmente a análise apresentada possui a simplificação de que

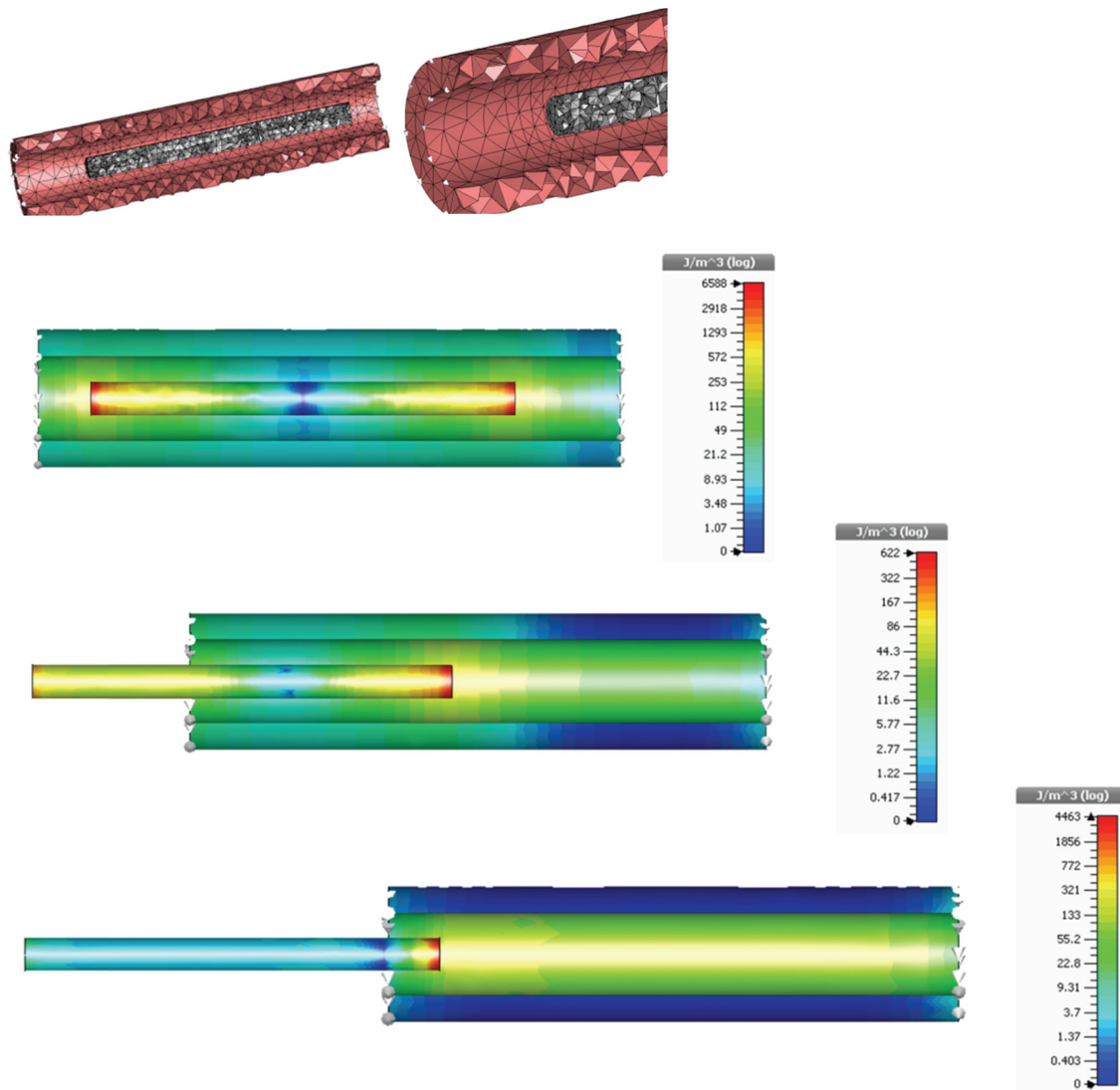


Figura 5: Parte superior; detalhe da malha usada na simulação eletromagnética e parte inferior, densidade de corrente simulada para diferentes posições do projétil.

Tabela 1: Características do modelo RLC, $R = 1,21\Omega$ e $L = 384 \mu H$ (sem armadura)

C [mF]	α	ω_o	Característica	s_1	s_2
10	1.58E3	5,1E2	sobreamortecido	-84,2	-309
3		2,9E2	sobreamortecido	-27,6	-315

o indutor não possui valor fixo, sendo variante no tempo.

O sistema foi ensaiado com os capacitores carregados até a tensão de 250 V, e o projétil foi disparado tendo 5 mm de seu comprimento posicionado dentro da bobina (experimentalmente verificado como produzindo alta velocidade de escape). A medida de corrente foi executada com uma ponta de osciloscópio apropriada para corrente (tipo “clamp”), que produz uma tensão proporcional à corrente cir-

culante. A figura 8 apresenta a comparação entre a medida de corrente e a simulação, executada de acordo com o modelo circuitual da fig. 7. Três disparos sucessivos foram executados, para confirmar que a corrente apresente pouca variação. A comparação de ambas curvas mostra que o modelo circuitual, embora apresente uma indutância invariante no tempo, permite prever com razoável precisão o comportamento real do sistema.

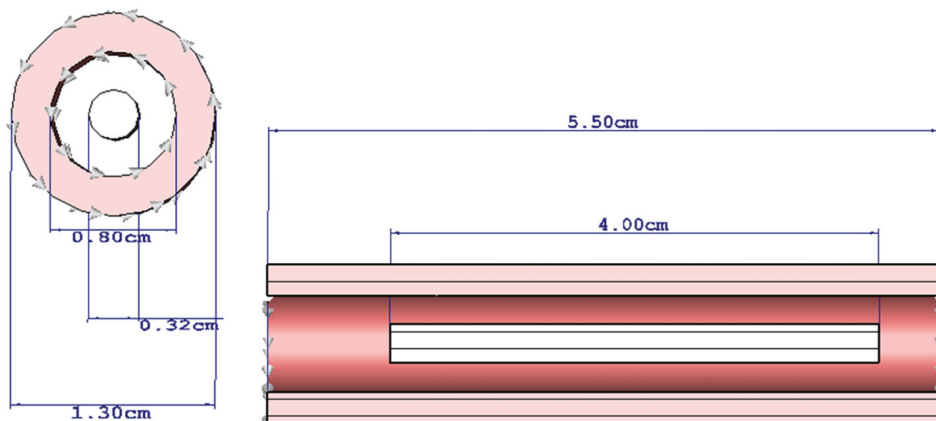
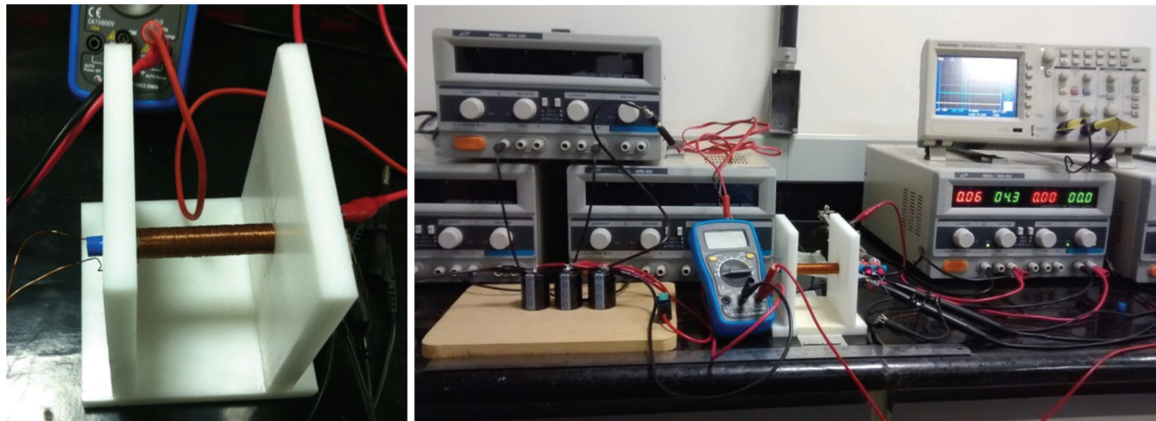


Figura 6: Protótipo (topo, detalhe da bobina; foto intermediária sistema completo) e (parte inferior) dimensões da bobina e projétil usado.

6. Instrumentação para medida de velocidade

Inicialmente, a velocidade do projétil foi estimada como o tempo decorrido entre o sinal de disparo (descarga dos capacitores) e o som causado pelo impacto do projétil contra um alvo plástico colocado a uma distância definida do Coilgun (aproximadamente 1 metro). O som do impacto era captado por um microfone de eletreto simples enquanto o disparo era amostrado eletricamente na chave, ambos sinais lidos em um osciloscópio, para extração do tempo entre ambos pulsos. O sistema operou satisfatoriamente, contudo a velocidade calculada era a velocidade média em função da grande distância (distâncias menores impunham perigos de perfuração e ricocheteio do projétil).

Como o interesse consiste em captar a velocidade de escape do projétil exatamente na saída do Coilgun, foi implementada a medida através da

indução da tensão devido ao acoplamento do campo do projétil em duas bobinas colocadas na saída do Coilgun – sendo a distância entre as bobinas conhecidas bastava determinar o tempo transcorrido entre os picos de tensão (figura 9) algo semelhante ao implementado em [14]. Contudo foi observado que na prática havia um acoplamento grande entre ambas bobinas leitoras, de maneira que era impossível distinguir dois pulsos com clareza no osciloscópio – a não ser que a distância d entre ambas bobinas fosse estendida, o que recairia numa medida de velocidade não tão próxima da instantânea no ponto de escape, mesmo caso do método anterior. Filtros passa-baixa e passa-alta implementados para condicionamento do sinal não possibilitaram melhora na clareza da identificação dos pulsos, sendo portanto esse segundo método abandonado.

O método final para a medição de velocidade foi baseado em dois lasers posicionados diretamente na saída da bobina, separados por 1,5 cm (conforme

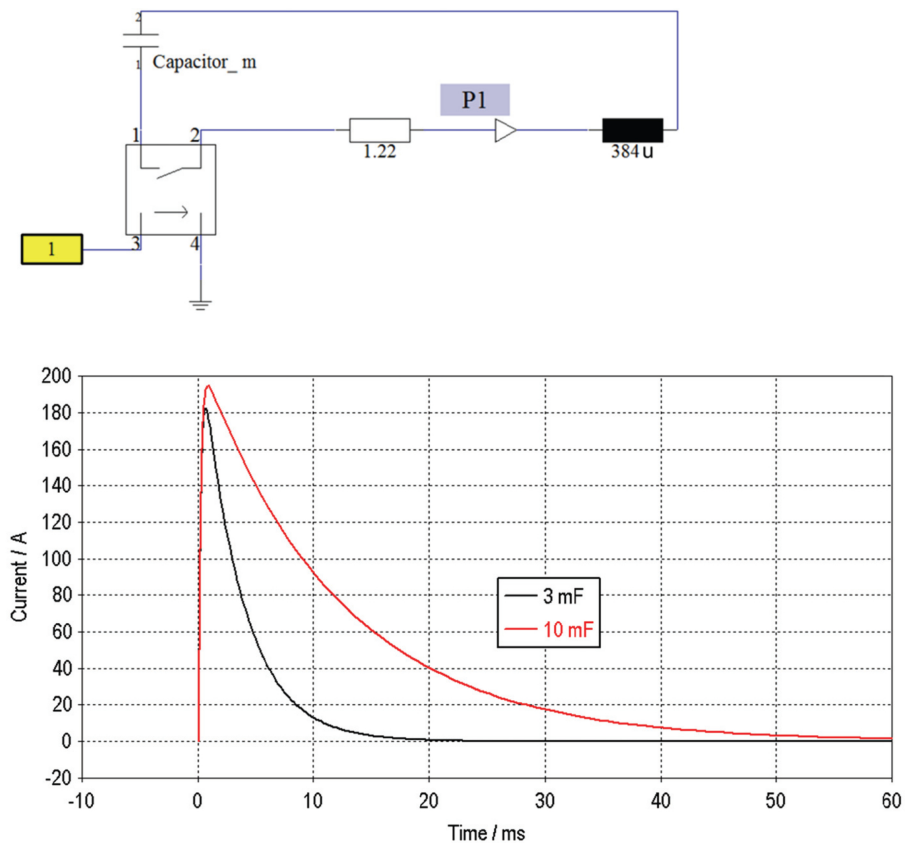


Figura 7: (topo) esquemático do circuito simulado. O ponto P1 amostra a corrente na malha; (parte inferior) corrente circulante na malha para os dois capacitores.

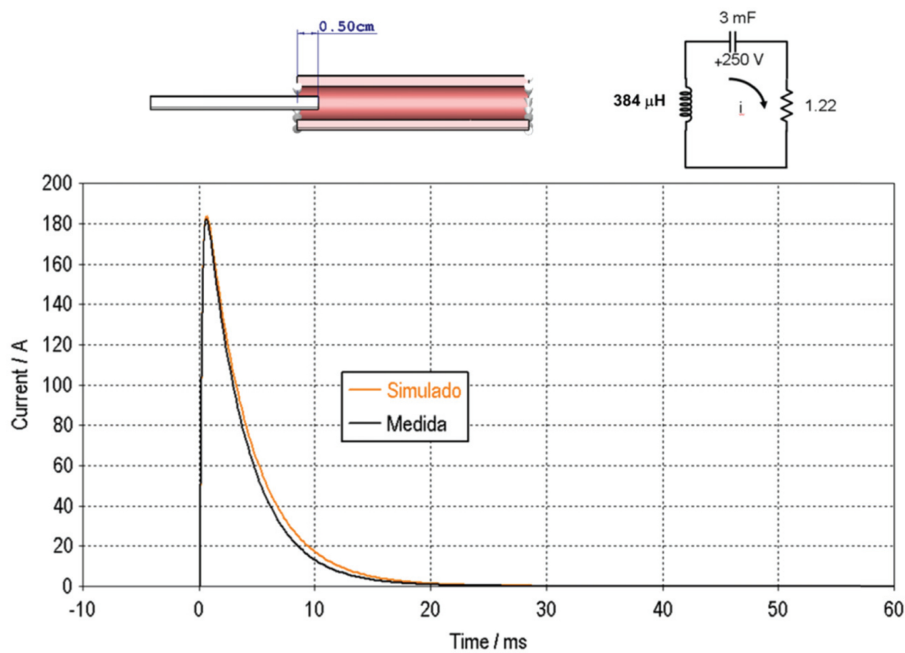


Figura 8: Comparação entre a corrente medida e simulada, para o projétil posicionado conforme o detalhe superior esquerda. O modelo elétrico correspondente é apresentado na parte superior direita.

figura 9, associada ao parâmetro d). Associado a cada laser há um fototransistor devidamente polarizado que na passagem do projétil muda de estado lógico, sendo assim possível calcular a velocidade através do tempo entre os pulsos, medido em um osciloscópio (figura 10).

A tabela 2 apresenta a velocidade medida para diferentes posições iniciais do projétil dentro da bobina, parâmetro denominado x_o , para valor de capacitância de 3 mF (apresentado na figura 11). Há uma posição inicial ótima, que produz a excitação com aceleração apenas em uma direção (i.e. não há força de frenagem devido ao projétil passar pelo ponto médio da bobina). O projétil usado possui uma massa de 2.5 gramas.

O rendimento extremamente baixo mostra que grande parte da energia se converte em calor, na forma de atrito do projétil com o solenóide e mesmo dissipação nos fios (o interruptor de disparo frequentemente tem seus contatos fundidos em caso de disparos consecutivos sem devido tempo de resfriamento). O ponto de máxima velocidade ($x_o = 5$ mm) foi testado também com o capacitor de 10 mF, resultados apresentados na tabela 3.

Conforme apresentado anteriormente, embora a capacitância maior apresente uma quantidade de energia eletrostática armazenada a velocidade é menor, uma vez que provavelmente o projétil atravesse a metade da comprimento do solenóide ainda com

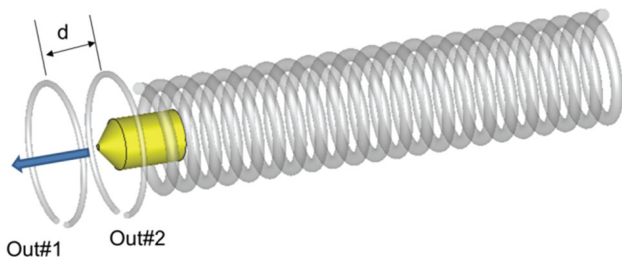


Figura 9: Arte mostrando o sistema de medida de velocidade a partir da tensão induzida pelo projétil em duas bobinas separadas por uma distância d .

Tabela 2: Medida de velocidade e eficiência para diferentes pontos iniciais do projétil dentro da bobina.

Distância inicial x_o [mm]	Velocidade medida v_e [m/s]	Energia cinética E_c [J]	Energia eletrostática E_e [J]	Rendimento η [%]
5	15,0	0,28	93,7	0,30
10	13,9	0,24	93,7	0,25
15	11,7	0,17	93,7	0,18
20	9,1	0,10	93,7	0,11
25	6,0	0,05	93,7	0,05

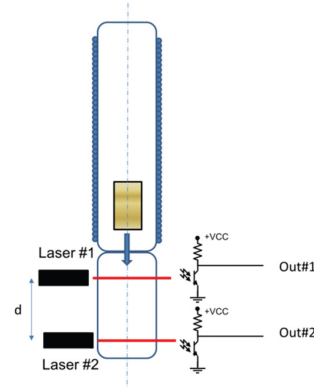
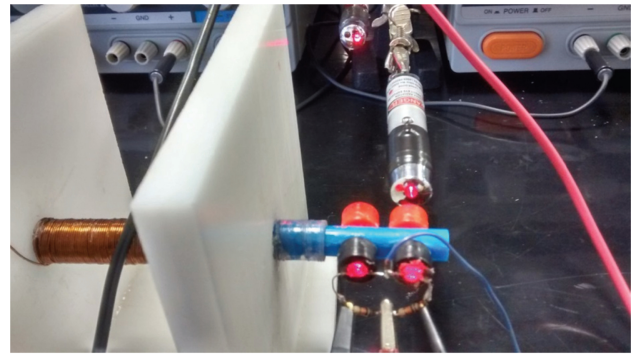


Figura 10: Detalhe dos dois lasers acoplados para medir a velocidade de escape do projétil, foto (esquerda) e esquema elétrico simplificado (direita).

Tabela 3: Medida de velocidade e para as capacitâncias de 3 mF e 10 mF.

Capacitância [mF]	Velocidade medida v_e [m/s]
3	15,0
10	10,0

campo magnético intenso, sendo assim submetido a uma força de frenagem. Para obter melhor uso da capacitância maior seria necessária uma bobina (estator) mais longo.

7. Conclusões

O artigo trata do projeto e análise de um Coilgun de pequenas dimensões. Análises relativamente simpli-

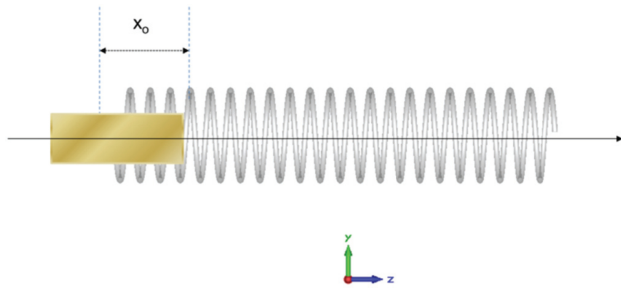


Figura 11: Definição do parâmetro x_0 – a distância inicial de penetração do projétil dentro da bobina.

ficadas possibilitam compreensão dos fenômenos de aceleração do projétil metálico inserido no interior de um solenoide com núcleo de ar. Um protótipo de baixo custo foi desenvolvido e testado, com diferentes aspectos constructivos e operacionais avaliados. Finalmente, a instrumentação necessária para medida da velocidade de escape foi desenvolvida após três tentativas diferentes de implementação, possibilitando avaliar o desempenho do sistema de maneira quantitativa.

Referências

- [1] B. Marder and A. Coilgun, *IEEE Transactions on Magnetism* **27**, 701 (1993).
- [2] E. Levi, J.L. He, Z. Zabar and L. Birenbaum, *IEEE Transactions on Magnetism* **27**, 628 (1993).
- [3] R. Kaye, B. Turman, M. Aubuchon, D. Lamppa, G. Mann, Edward van Reuth, K. Fulton, G. Malejko, P. Magnotti, D. Nguyen, D. Borgwarth, A. Johnson and R. Poppe, in: *16th IEEE International Pulsed Power Conference* (IEEE, Piscataway, 2007), p. 1810-1813.
- [4] T.R. Lockner, R.J. Kaye and Bob N. Turman, in: *Modulator Symposium* (IEEE, Piscataway, 2004), p. 119-121.
- [5] B.D. Skurdal and R.L. Gaigler, *IEEE Transactions on Magnetism* **45**, 458 (2009).
- [6] U. Hasirci and A. Balikci, in: *4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies* (IEEE, Piscataway, 2009), p. 233-236.
- [7] H.D. Fair, *IEEE Transactions on Magnetism* **45**, 225 (2009).
- [8] J.M. Schroeder, J.H. Gully and M.D. Driga, *IEEE Transactions in Magnetism* **25**, 504, (1989).
- [9] R. Pastore, G. Giannini, R.B. Morles, M. Marchetti and D. Micheli, in: *Nanocomposites - New Trends and Developments* (INTECH Open Access Publisher, Croatia, 2012), chap. 9.
- [10] E.M. Purcell, *Electricity and Magnetism* (McGraw Hill, New York, 1985), 2a ed.
- [11] K. Chan, G. Clark, D. Helmlinger and D. Ng, *Electromagnetic Coil Gun: Final Report*, disponível em <http://gdclark.com/wp-content/uploads/2014/08/FinalReport1.pdf>, acesso em 12/11/2015.
- [12] CST, www.cst.com. Versão 2015.
- [13] M.N.O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics* (CRC Press, Boca Raton, 2000), 2a ed.
- [14] P. Fiala, M. Friedl, M. Kovac, V. Benes, R. Koci and I. Behunek, in: *PIERS Proceedings* (PIERS, Cambridge, 2013), p. 1238-1241.