

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
ARMAMENTO**

**CAPITÃO-TENENTE
LEONARDO PECORELLA SARTO**

**ESTUDO INICIAL DO FENÔMENO DE UM CANHÃO ELETROMAGNÉTICO
(RAILGUN)**

**RIO DE JANEIRO
2021**

CAPITÃO-TENENTE
LEONARDO PECORELLA SARTO

ESTUDO INICIAL DO FENÔMENO DE UM CANHÃO
ELETROMAGNÉTICO (RAILGUN)

Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica e de Armamento do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica e de Armamento.

Orientador(es): TC Refm Carlos Augusto Vieira Carneiro,
M.Sc.

Rio de Janeiro
2021

©2021

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Sarto, Capitão-Tenente

Leonardo Pecorella.

Estudo Inicial do Fenômeno de um Canhão Eletromagnético (Railgun) /
Capitão-Tenente

Leonardo Pecorella Sarto. – Rio de Janeiro, 2021.

45 f.

Orientador(es): TC Refm Carlos Augusto Vieira Carneiro.

Projeto de Final de Curso (graduação) – Instituto Militar de Engenharia, Engenharia Mecânica e de Armamento, 2021.

1. railguns. 2. propulsão eletromagnética. 3. eletromagnetismo. i. Vieira Carneiro, TC Refm Carlos Augusto (orient.) ii. Título

**CAPITÃO-TENENTE
LEONARDO PECORELLA SARTO**

**Estudo Inicial do Fenômeno de um Canhão
Eletromagnético (Railgun)**

Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica e de Armamento do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica e de Armamento.

Orientador(es): TC Refm Carlos Augusto Vieira Carneiro.


Aprovado em Rio de Janeiro, 14 de Outubro de 2021, pela seguinte banca examinadora:



Prof. TC Refm Carlos Augusto Vieira Carneiro - M.Sc. do IME -
Orientador



Prof. TC R/1 Egydio Carvalho Souza Caria - M.Sc. do IME



Prof. TC QEM/Armt Carlos Frederico de Matos Chagas - D.Sc. do IME

Rio de Janeiro

2021

AGRADECIMENTOS

Ao meu Professor e Orientador, o Coronel Vieira Carneiro, pela sua bondade e paciência ao longo da execução desse trabalho.

Ao 1ºTen, chefe da garagem e 1º Ten Torres, chefe da seção de transportes, por disponibilizar o pessoal e material necessário para a execução dos testes experimentais.

Aos meus amigos mecânicos que indiretamente me auxiliaram neste projeto.

À minha esposa Ana Paula, pelo seu amor e sacrifícios pessoais ao longo desses cinco anos de curso.

E à minha filha Laura, por me proporcionar alegria em dias de trovão.

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se um estudo fenomenológico de um canhão eletromagnético sobre trilhos paralelos (*railgun*) para propulsão magnética de um material sólido inerte (projétil). Neste estudo inicial, propõe-se um equacionamento desta propulsão eletromagnética para um projétil inerte sobre trilhos com uma armadura, ambos condutores elétricos (trilhos e armadura), promovendo um melhor entendimento deste fenômeno. Simulações numéricas relativas a este fenômeno elétrico são realizadas em MATLAB[®]. Além disso, é elaborado experimento para descrever seu funcionamento, baseado nesta teoria descrita, onde, ao final, é realizada uma prova conceitual.

Palavras-chave: railguns. propulsão eletromagnética. eletromagnetismo.

ABSTRACT

In this work, we present a phenomenological study of rail gun on parallel rails for magnetic propulsion of an inert solid material (projectile). In this initial study, a system of proposed equations of this electromagnetic propulsion of the inert projectile on rails with an armature is reported, both of materials that are electrical conductors, promoting a better understanding of this phenomenon. Numerical simulations related to this electrical phenomenon are performed in MATLAB[®]. But also, a simple experiment is elaborated to describe its operation, based on this described theory.

Keywords: railguns. electromagnetic propulsion. eletromagnetism.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Funcionamento do <i>railgun</i>	12
Figura 2 – Desenho esquemático de configurações de um (a) <i>railgun</i> convencional, de um (b) <i>railgun</i> aumentado, de um (c) <i>railgun</i> helicoidal e de um (d) <i>railgun</i> helicoidal de alta performance	13
Figura 3 – Conjunto de lançamento composto por armadura, sabot e projétil . . .	14
Figura 4 – Concepção de um projétil do tipo <i>HVP</i>	15
Figura 5 – Protótipos de <i>railgun</i> da (a) <i>General Atomic System</i> e da (b) <i>BAE System</i>	16
Figura 6 – <i>Railgun</i> chinês embarcado para realização de testes	16
Figura 7 – Concepção do <i>railgun</i> turco, Şahi-209	17
Figura 8 – Desenho esquemático do (a) fluxo ideal da corrente elétrica na armadura e do (b) Fluxo real da corrente elétrica na armadura	20
Figura 9 – Campo magnético induzido por corrente	23
Figura 10 – Esquema da Lei de Bio-Savart	23
Figura 11 – Campo magnético induzido por trilhos de seção circular	25
Figura 12 – Vista em corte dos trilhos de seção retângular	26
Figura 13 – Circuito Elétrico do Lançador Eletromagnético	27
Figura 14 – Representação em circuito elétrico dos trilhos e armadura	28
Figura 15 – Diagrama de blocos utilizado em <i>simulink</i> ®	30
Figura 16 – Gráfico de variáveis relativas ao tempo: (a) corrente, (b) velocidade e a (c) força	31
Figura 17 – Modelagem em <i>simulink</i> ® das equações de estado	31
Figura 18 – Reprodução dos gráficos apresentados por: (a) corrente, (b) velocidade e (c) força	32
Figura 19 – Aparato experimental	33
Figura 20 – Comportamento da força magnética de acordo com: (a) o tempo, (b) distância entre os trilhos	34
Figura 21 – Gráfico de variáveis relativas ao tempo a partir dos dados da tabela 3: (a) corrente, (b) velocidade, (c) força e (d) deslocamento	35
Figura 22 – Foguete de campanha com empenas impresso.	36
Figura 23 – Teste com tubo de alumínio	36
Figura 24 – Teste com fio de cobre.	37
Figura 25 – Teste com grafite.	38
Figura 26 – Espectro característico do balim.	38
Figura 27 – Composição percentual do balim.	39
Figura 28 – Teste de um coilgun.	39

Figura 29 – Campo magnético do solenóide atraindo o balim.	40
Figura 30 – Forças atuantes no balim.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Kerrisk	26
Tabela 2 – Especificações para a simulação numérica	29
Tabela 3 – Parâmetros estimados para a simulação numérica	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	O RAILGUN	12
1.1.1	VISÃO GERAL	12
1.1.2	ARQUITETURA DO RAILGUN	12
1.1.3	TRILHOS	13
1.1.4	ARMADURA	14
1.1.5	PROJETIL	14
1.2	NOVAS TENDÊNCIAS NA BATALHA NAVAL	15
1.2.1	ESTADOS UNIDOS	15
1.2.2	CHINA	16
1.2.3	TURQUIA	17
1.2.4	EUROPA	17
1.3	VANTAGENS DA PROPULSÃO ELETROMAGNÉTICA	17
1.4	DESAFIOS DA PROPULSÃO ELETROMAGNÉTICA	18
1.4.1	REQUISITOS PARA OS TRILHOS	18
1.4.1.1	GOIVAGEM (GOUGING)	19
1.4.1.2	ARCO ELÉTRICO	19
1.4.1.3	DEPOSIÇÃO DE MATERIAL	19
1.4.1.4	FLUXO DE CORRENTE CONCENTRADA	20
1.5	DESCRIÇÃO DO TRABALHO	21
2	MODELAGEM TEÓRICA E EXPERIMENTAL	22
2.1	CONCEITOS BÁSICOS DO ELETROMAGNETISMO	22
2.1.1	DEFINIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO	22
2.1.2	CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO POR CORRENTE	23
2.1.3	FORÇA MAGNÉTICA EM UM FIO PERCORRIDO POR CORRENTE	24
2.1.4	INDUTORES E INDUTÂNCIA	24
2.1.4.1	DEDUÇÃO DO GRADIENTE DE INDUTÂNCIA	25
2.1.4.2	GRADIENTE DE INDUTÂNCIA PELO MÉTODO DE KERRISK	26
2.1.5	GRADIENTE DE RESISTÊNCIA	26
2.2	MODELAGEM DO EXPERIMENTO	27
2.2.1	CIRCUITO BÁSICO DO CANHÃO ELETROMAGNÉTICO	27
2.2.2	EQUACIONAMENTO E MODELAGEM DO CIRCUITO ELÉTRICO	28
2.3	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	30
2.4	MODELAGEM PARA O EXPERIMENTO	32

2.5	EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO	35
2.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
3	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 O Railgun

1.1.1 Visão Geral

O *railgun*, ou canhão sobre trilhos, é um dispositivo eletromagnético que permite o lançamento de artefatos e projetis. Ao contrário de dispositivos tradicionais que utilizam a força de pressão de gases, o *railgun* usa a força magnética, permitindo velocidades surpreendentes na faixa de 2-3 km/s. O aparato consiste, basicamente, de uma fonte de energia, dois longos trilhos paralelos condutores e uma "armadura" condutora que fecha o circuito e aloja o projetil. Conectando-se os trilhos à fonte de energia, a alta corrente produzida percorre o circuito elétrico passando de um trilho para outro (através da armadura), criando um campo magnético perpendicular ao circuito, como enuncia a Lei de Ampère. A atuação simultânea do campo magnético e da corrente elétrica dá origem à Força de Lorentz, que passa a acelerar o conjunto armadura-projetil, como mostra a figura 1 [1].

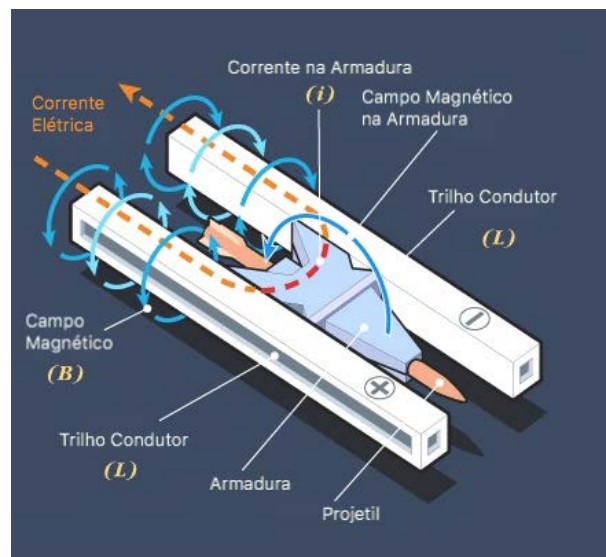


Figura 1 – Funcionamento do *railgun* [2].

1.1.2 Arquitetura do Railgun

Atualmente, existem diversas configurações de lançadores eletromagnéticos, entretanto, costuma-se classificá-los em dois grandes grupos: os de corrente contínua (CC), onde a energia é fornecida diretamente à armadura; e os de corrente alternada (CA), onde a energia é fornecida à armadura através de indução eletromagnética (não contemplados

neste trabalho). Dentre os lançadores CC, alguns exemplos são: *railgun* convencional, *railgun* aumentado, lançador helicoidal convencional e lançador helicoidal de alta eficiência. A figura 2 ilustra cada um desses lançadores [3].

Os *railguns* convencionais possuem o projeto mecânico mais simples, contudo, essa simplicidade impõe limites ao seu desempenho em muitos aspectos. Por exemplo, limita a força por ampère quadrado (força específica) que pode ser gerada na propulsão do projétil. Dessa forma, *railguns* convencionais devem operar em corrente mais alta para gerar a mesma força de aceleração em comparação a lançadores de força específica mais elevada [3].

Para aumentar a força específica, por exemplo, o *railgun* aumentado usa enrolamentos adicionais que percorrem o comprimento do lançador e, como resultado, uma fonte de alimentação mais simples pode ser utilizada. Nos lançadores helicoidais (convencional e de alta eficiência), a corrente elétrica que percorre os solenóides gera campos magnéticos opostos, levando-os a se repelir, acelerando a armadura. Embora mais complexos, os lançadores helicoidais permitem uma força específica de 1 a 2 ordens de magnitude maior do que um canhão elétrico de tamanho similar. Observa-se, que no de alta eficiência, o campo magnético gerado no trilho é aproveitado no interior do solenóide [3].

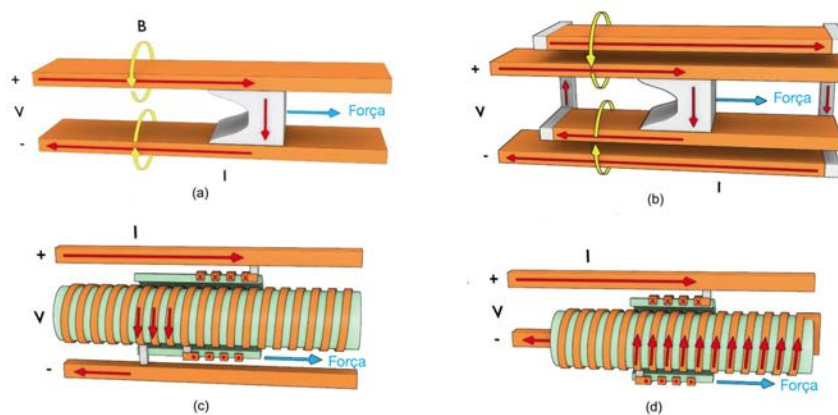


Figura 2 – Desenho esquemático de configurações de um (a) *railgun* convencional, de um (b) *railgun* aumentado, de um (c) *railgun* helicoidal e de um (d) *railgun* helicoidal de alta performance [3].

1.1.3 Trilhos

Os trilhos paralelos utilizados nos *railguns* possuem dupla finalidade: atuar como condutores elétricos, permitindo o deslocamento da armadura (e projétil acoplado) e servir de barreira física, limitando o movimento das partes móveis em apenas um eixo. O valor de pico do pulso elétrico é geralmente da ordem de centenas de milhares de Ampères e, por sua vez, uma quantidade significativa de energia elétrica é perdida devido à resistência do trilho na forma de dissipação de calor (efeito Joule). Além disso, a força de atrito

gerada pelo contato entre a armadura e os trilhos é responsável pela desaceleração do projétil. Dessa forma, pode-se dizer que o material dos trilhos desempenha um papel importante na eficiência do lançamento. Logo, materiais com alta condutividade elétrica e baixo coeficiente de atrito, e confeccionados com baixa rugosidade devem ser usados nos trilhos [4].

1.1.4 Armadura

O conjunto propulsado consiste, geralmente, em três partes. A primeira parte, condutora, é chamada armadura. Ela auxilia na continuidade do circuito elétrico, permitindo que a corrente a atravesse, fluindo de um trilho a outro. A segunda parte, denominada *sabot*, é utilizada para manter o projétil em uma posição precisa sobre os trilhos, evitando a sua instabilidade durante o seu percurso sobre o trilho e sendo feita de material não condutor elétrico. A terceira parte é o objeto que se pretende lançar (no caso do *railguns*, um material sólido – o projétil). Durante o funcionamento, a armadura impulsiona o projétil com sabot e conduz a corrente elétrica entre os trilhos. Conforme a corrente passa pela armadura, o conjunto começa a se mover por ação da força eletromagnética. Quando o conjunto deixa o tubo, a armadura desprende-se, o sabot se abre devido a sua geometria e à aerodinâmica, produzindo uma força de arrasto com o ar, separando-se do projétil, e caindo logo em seguida. Dessa forma, o projétil segue sua trajetória com uma hipervelocidade. Um exemplo é ilustrado na figura 3. [4]

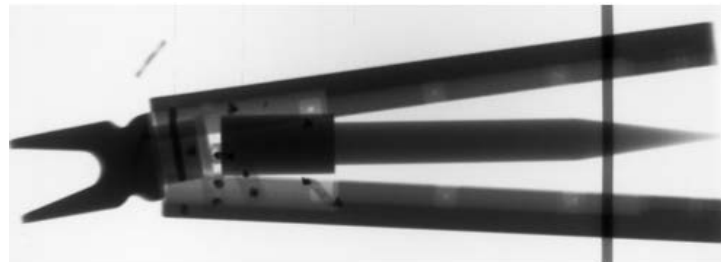


Figura 3 – Conjunto de lançamento composto por armadura, sabot e projétil [5].

1.1.5 Projétil

Além do sistema de propulsão inovador dos *railguns*, pretende-se dotá-los de projetis revolucionários. O Departamento de Defesa dos Estados Unidos (*DoD*), solicitou à *BAE Systems*, uma empresa do setor bélico, um projétil de hipervelocidade (*HVP*) para suas forças armadas e para seus aliados. O design aerodinâmico de baixo arrasto permite altas velocidades, melhoria nas capacidades de manobra e menor tempo até o alvo, dispensando a necessidade de um motor de foguete para estender o alcance do canhão [6].

Devido ao alto potencial do projétil, os EUA pretendem ampliar a utilização dos *HVPs* em canhões tradicionais de pólvora. As versões nos calibres 5 polegadas e 155 mm

já estão em desenvolvimento. Embora não consigam atingir o alcance de 185 km quando disparados dos *railguns*, a propulsão tradicional aliada aos *HVPs* atinge facilmente os 80 km de distância, chegando até os 130 km, o que é bastante satisfatório [7].



Figura 4 – Concepção de um projétil do tipo *HVP* [7].

1.2 Novas Tendências na Batalha Naval

Neste item, pretende-se relatar algumas das novas tendências do emprego de canhões eletromagnéticos em batalhas em mares por alguns países que vem adotando em seu arsenal de guerra naval o *railgun*.

1.2.1 Estados Unidos

A Marinha dos EUA (*US.Navy*) vem desenvolvendo desde 2005 seu canhão eletromagnético. A concepção inicial de atuar em operações de apoio de fogo naval aos seus fuzileiros foi rapidamente ampliada; posteriormente, verificou-se o potencial dos *railguns* frente a ameaças como mísseis de cruzeiro anti-navio (*ASCMs*), mísseis balísticos anti-navio (*ASBMs*) e veículos aéreos não tripulados (*UAVs*). A pretensão da Marinha norte-americana é ter a capacidade de se defender contra essas ameaças em possíveis situações de combate que envolvam a China, que já opera e desenvolve esses mísseis [6].

Segundo alguns observadores, em um conflito hipotético e com as atuais limitações, a frota norte-americana precisaria evitar operar em águas que estão dentro do alcance dessas ameaças; já outros, afirmam que seria necessário alterar a arquitetura de sua frota — tornando-se menos dependente de navios de grande tonelagem, passando a ser mais dependente de navios de pequeno porte e submarinos. Sendo assim, os *railguns* poderiam suplantiar as atuais limitações da frota norte-americana [6].

Os dois primeiros protótipos, que foram encomendados às empresas *BAE Systems* e *General Atomics*, começaram seus testes em 2012. Planeja-se que até 2025 os *railguns* estejam operacionais a bordo de seus navios [6].



Figura 5 – Protótipos de *railgun* da (a) *General Atomic System* e da (b) *BAE System* [6].

1.2.2 China

Em janeiro de 2019, a China testou seu protótipo naval do *railgun* e espera-se que ele esteja operativo em 2025, de acordo com um relatório da inteligência dos Estados Unidos(CNBC). O protótipo embarcado foi visto pela primeira vez em 2011. De acordo especialistas, o *railgun* chinês seria capaz de atingir um alvo a uma distância de 200 km (108 milhas náuticas) a uma velocidade de 2.575 m/s. Entretanto, é possível que esses dados, pouco precisos, possam ser baseados nos próprios sistemas norte-americanos [8].



Figura 6 – *Railgun* chinês embarcado para realização de testes [8] .

1.2.3 Turquia

A Turquia vem desenvolvendo desde 2008 um canhão eletromagnético nacional, o Şahi-209, similar aos divulgados pelos EUA e China. O próximo passo é que seu canhão eletromagnético seja integrado a um navio de guerra para fazer os testes de mar da versão Block-II do canhão. O Şahi-209 é capaz de disparar munições de 35 mm de 1,5 kg a 10 MJ (MegaJoule), alcançando a velocidade hipersônica de Mach 6 e atingindo alvos a 50 km. A esses passos, a Turquia será o terceiro país a realizar testes navais em *railguns* [9].



Figura 7 – Concepção do *railgun* turco, Şahi-209 [9].

1.2.4 Europa

A Agência Europeia de Defesa (EDA) lançou um projeto de pesquisa a ser realizado por um consórcio composto por nove parceiros, dos quais cinco países são europeus. O projeto "PILUM" (*Projectiles for Increased Long-range effects Using ElectroMagnetic railgun*) é coordenado pelo Instituto de Pesquisa franco-alemão Saint-Louis (ISL) e durante um período de estudo de dois anos, deverá demonstrar que o conceito de lançadores eletromagnéticos é capaz de entregar aos projetis hipervelocidade e precisão a distâncias de centenas de quilômetros. O projeto de alta tecnologia também permitirá avanços em muitas áreas, como por exemplo: aerodinâmica, tecnologias de projetis, resistência dos materiais, armazenamento e conversão de energia, além de vários fenômenos elétricos e eletromagnéticos, que possam ser aplicados em várias áreas tecnológicas [10].

1.3 Vantagens da Propulsão Eletromagnética

Duas grandes limitações que os navios de superfície da *US.Navy* enfrentam atualmente para se defender contra mísseis de cruzeiro anti-navio (*ASCMs*) e mísseis balísticos anti-navio (*ASBMs*) são: a "profundidade de carregamento limitada" e os elevados custos relativos às ameaças enfrentadas. A profundidade limitada de carregamento refere-se ao

fato de seus navios engajarem um número limitado de mísseis anti-navio e *UAVs*, contra os quais são usados mísseis superfície-ar (*SAMs*). Dessa forma, após os disparos, o navio precisa se evadir para uma zona de recarga segura que pode estar a centenas de quilômetros de distância, retornando ao combate, somente, após esses longos trajetos. Por outro lado, os custos desfavoráveis referem-se ao fato de que os *SAMs* costumam ser expressivamente mais caros que os *UAVs* e os mísseis anti-navios abatidos. Para se ter uma ideia, um *SAM* varia de cerca de US\$ 900.0000 por unidade a vários milhões de dólares, dependendo de sua finalidade [6]. Assim, o emprego dos *railguns* poderia reverter as atuais limitações enfrentadas. Os dois protótipos construídos são projetados para disparar projéteis com níveis de energia de 20 a 32 MJ, o que é suficiente para propeler um projétil de 50 a 100 milhas náuticas (90 a 180 km) [6].

O canhão elétrico oferece diversas vantagens para o uso naval. Nas missões de bombardeio costeiro de longo alcance, a ausência de propelentes nos estojos torna mais seguro o manuseio do pessoal de bordo e permite que as avarias de combate sejam menos impactantes à sobrevivência da navio. O uso de hipervelocidade reduz a necessidade de produção de propelente, armazenamento, carregamento, transporte e rearmamento; possibilitando maior armazenamento de combustível e redução de custos, bem como o tamanho da tripulação. Os tiros efetuados pelos *railguns* também seriam menores e mais baratos (cerca de US\$ 25.000) que os atuais mísseis superfície-ar utilizados [11].

1.4 Desafios da Propulsão Eletromagnética

1.4.1 Requisitos para os Trilhos

Os trilhos de um *railgun* sofrem grandes exigências: altas correntes elétricas, altas temperaturas, elevados campos eletromagnéticos e altas velocidades de deslizamento. A escolha do material para os trilhos deve atender dois requisitos: maximizar a eficiência magnética e a durabilidade. A eficiência magnética pode ser maximizada minimizando-se a resistividade elétrica; a durabilidade do trilho depende das diferentes formas de falha que ocorrem por ocasião dos disparos. Logo, alta condutividade elétrica, dureza, elevada condutividade térmica e resistência à abrasão e ablação por arco são requisitos necessários ao projeto de um eficiente *railgun* [1].

A seguir, encontram-se alguns dos principais problemas observados na operação de canhões eletromagnéticos. Esses problemas constituem-se como desvantagens na sua utilização. Convém destacar as soluções são apresentadas em outros trabalhos como [1], por exemplo, e não serão abordadas aqui.

1.4.1.1 Goivagem (Gouging)

O *gouging* refere-se ao cisalhamento que ocorre entre os trilhos e a armadura [1]. Inicialmente, imaginava-se que o fenômeno ocorresse devido às altas velocidades de deslizamento, entretanto, descobriu-se ser um fenômeno de limiar, causado pela interação de asperezas microscópicas para qualquer par de materiais (armadura e trilhos), nos quais havia uma velocidade limite abaixo da qual o *gouging* não ocorria [12].

Devido a sua alta condutividade elétrica, escolhe-se para os trilhos o cobre e suas ligas; enquanto que para a armadura, o alumínio é uma escolha mais comum. A inversão na aplicação desses materiais reduziria substancialmente o efeito de *gouging*, já que o alumínio possui um limite de escoamento mais elevado. Entretanto, dois problemas novos surgiriam: o cobre, mais denso que o alumínio, prejudicaria a aceleração do conjunto propulsado pelo acréscimo de peso na armadura; além disso, o alumínio possui pior condutividade elétrica que o cobre, o que implicaria em uma amplitude menor de corrente e, conseqüentemente, menor força propulsora. Atualmente, há formas de contornar esses efeitos pelo uso de armaduras e trilhos de material de baixa densidade e alta dureza. Uma outra forma de solucionar este problema é aplicar uma película de um material bastante duro sobre os trilhos, particularmente películas de alumínio ou grafite [13].

1.4.1.2 Arco Elétrico

O dano causado por arco elétrico ocorre pela existência de pequenas lacunas entre a armadura e os trilhos, impossibilitando o contato direto de ambos [13]. A formação de arcos é responsável por causar uma série de problemas, como por exemplo: redução da eficiência de lançamento, destruição de materiais de isolamento e danos aos trilhos; sendo muito prejudicial ao lançamento eletromagnético, devendo ser eliminado [14].

Um dos fatores para o surgimento de lacunas (ou ranhuras) é a própria execução dos disparos. Essas ranhuras podem ocorrer em pontos próximos à posição inicial de deslizamento do conjunto ou mais avante nos trilhos. A elevação de temperatura reduz o limite de escoamento dos materiais, permitindo deformações e originando as lacunas. Além disso, eventualmente, a fusão do alumínio da armadura, acelera a corrosão dos trilhos de cobre, agravando o surgimento das lacunas [1].

1.4.1.3 Deposição de Material

A deposição de material nos trilhos é um dos problemas mais prejudiciais ao desempenho geral dos *railguns*. Isso pode ocorrer quando o material da armadura é depositado nos trilhos devido ao seu derretimento ou descascamento, como por exemplo, uma armadura de alumínio pode derreter nos trilhos de cobre, e pode penetrar e arruinar o acabamento liso dos trilhos. Enquanto líquido, o alumínio pode atuar como um lubrificante

condutor, mas, por outro lado, uma vez que solidifica, pode deixar uma camada espessa, de revestimento escamoso, poroso e irregular nos trilhos [15, 16].

Ter mau contato e menor área de contato apenas aumenta e acelera o derretimento. Um melhor contato pode ajudar a mitigar os danos de deposição, mas apenas até certo ponto. Se a armadura tiver contato perfeito em toda a sua área de superfície, a corrente ainda fluirá apenas pela extremidade posterior da armadura, causando aquecimento ôhmico e derretimento; já que a hipótese de a corrente fluir por toda a seção reta da armadura é uma idealização [13].

1.4.1.4 Fluxo de Corrente Concentrada

O fenômeno do fluxo de corrente concentrada é uma das principais causas da maioria dos problemas que afeta os *railguns*, que se constituindo um grande limitador da eficiência dos canhões eletromagnéticos. Quando a corrente que percorre os trilhos encontrar a armadura, a tendência é que a corrente percorra a parte posterior da armadura. Entretanto, à medida que o deslocamento ocorre, a corrente e os campos magnéticos gerados podem se tornar menos concentrados na região, fazendo com que a corrente se espalhe por toda a superfície de contato [13].

Para velocidades elevadas, a corrente elétrica tende a ficar ainda mais restrita na parte posterior da armadura, não restando tempo para ocorrer difusão de seu fluxo. Conseqüentemente, é possível que até 80% desse fluxo possa ocorrer na parte posterior, o que resulta em um rápido aquecimento, podendo ultrapassar a temperatura de fusão do alumínio, fazendo-o derreter na interface com os trilhos.[13]

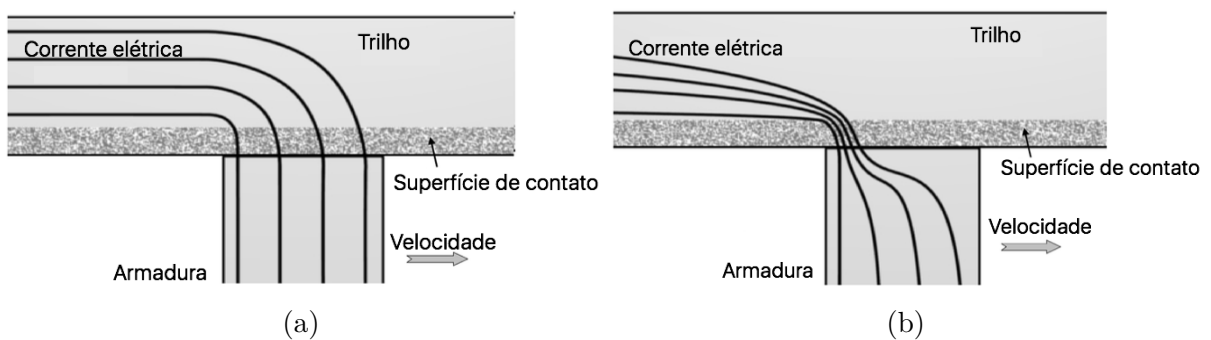


Figura 8 – Desenho esquemático do (a) fluxo ideal da corrente elétrica na armadura e do (b) Fluxo real da corrente elétrica na armadura [13].

1.5 Descrição do Trabalho

No capítulo da Introdução pretende-se reportar sobre o funcionamento e as devidas características de canhões eletromagnéticos sobre trilhos; suas vantagens, desvantagens e desafios. Por sua vez, um estudo inicial do funcionamento do *railgun* com base na teoria envolvida com descrição dos parâmetros envolvidos é apresentado no capítulo que se segue. Além disso, um experimento é proposto para verificação da teoria envolvida com descrição de suas partes componentes. Adicionalmente, resultados numéricos são dispostos como campo magnético, força magnética, velocidade e posição do projétil, todos descritos em função do tempo e reportadas nos resultados numéricos. Conclusões e sugestões são apresentadas bem como as referências bibliográficas. Assim, neste trabalho, pretende-se apresentar um estudo fenomenológico de um canhão eletromagnético sobre trilhos paralelos (*railgun*) com propulsão de um material sólido inerte (projétil) e um experimento descrevendo seu funcionamento, baseado em uma teoria descrita.

2 MODELAGEM TEÓRICA E EXPERIMENTAL

O magnetismo é um fenômeno que proporciona a atração ou a repulsão entre certos materiais. Esse fenômeno é conhecido pela humanidade há milhares de anos. Entretanto, os mecanismos responsáveis pela explicação desse fenômeno são complexos e sutis, por isso, foi elaborada uma teoria, posteriormente, para prever tais fenômenos observáveis. Muitos dispositivos tecnológicos usados atualmente têm, em sua maioria, como meio básico de funcionamento o magnetismo. Como exemplo, notam-se os geradores, transformadores, motores elétricos, entre outros. [17]

2.1 Conceitos Básicos do Eletromagnetismo

2.1.1 Definição do Campo Magnético

As forças magnéticas originam-se da interação entre cargas elétricas em presença de campos magnéticos. Experimentos demonstram que as partículas elétricas, em movimento, sofrem desvios de trajetória quando em presença desses campos. Verifica-se que a força atuante sobre essas partículas é proporcional à carga elétrica da partícula e à sua velocidade; além disso, a força atuante é perpendicular às direções da velocidade e do campo magnético [17, 18]. Assim, define-se o vetor força magnética conforme a equação 2.11:

$$\mathbf{F}_m = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

onde q é a carga da partícula e \mathbf{v} o vetor velocidade [17].

O campo magnético \mathbf{B} , cuja unidade no SI é o **tesla** (T), pode ser definido, a partir da equação anterior, em função dos demais parâmetros:

$$1T = \frac{\textit{newton}}{(\textit{coulomb})\left(\frac{\textit{metro}}{\textit{segundo}}\right)} \quad (2.2)$$

Ao atuar na presença de uma espira, por exemplo, é possível quantificar o fluxo magnético Φ_B que atravessa essa superfície 2.3 como:

$$\Phi_B = \int \mathbf{B}d\mathbf{A} \quad (2.3)$$

cuja unidade é o **weber** (Wb). Onde $1Wb = 1T.m^2$ [17].

2.1.2 Campo Magnético Produzido por Corrente

Quando uma corrente elétrica percorre um fio condutor retilíneo, um campo magnético circular forma-se ao longo de toda a sua extensão. As linhas desse campo são concêntricas em relação ao fio. O seu sentido é determinado pela regra da mão direita [17, 18], conforme figura 9.

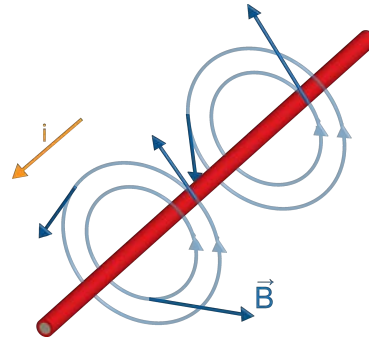


Figura 9 – Campo magnético induzido por corrente.

Segundo a lei de Bio-Savart, o vetor campo magnético infinitesimal $d\mathbf{B}$ produzido pela corrente i que passa por um fio infinitesimal de comprimento dl em um ponto P do espaço é dado por:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{i d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (2.4)$$

onde μ_o é a constante de permeabilidade do vácuo ($\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot m/A$), e \mathbf{r} é o vetor que liga dl ao ponto P [17, 18].

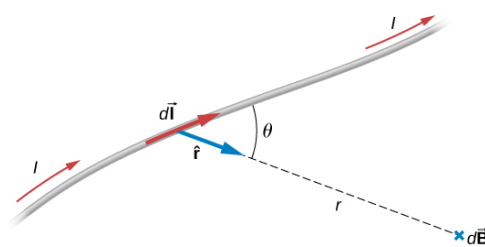


Figura 10 – Ilustração da Lei de Bio-Savart .

De posse da equação 2.4 e imaginando a existência de um fio retilíneo longo semi-infinito, é possível deduzir a expressão para a intensidade do campo magnético em um ponto P situado a uma distância x , perpendicular ao fio [17, 18]. A expressão é:

$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi x} \quad (2.5)$$

2.1.3 Força Magnética em um Fio Percorrido por Corrente

Considerando-se dl um trecho infinitesimal de um fio cuja seção transversal possui área A . Define-se a densidade de corrente j , como a quantidade de carga que atravessa o volume infinitesimal Adl a cada segundo [18]. De outra forma, j pode ser entendido como o produto de n (número de portadores de carga por unidade de volume); q (carga da partícula); e \bar{v} (velocidade média das partículas associada à corrente), de modo que:

$$\mathbf{j} = nq\bar{\mathbf{v}} \quad (2.6)$$

cujas unidades são o ampère por metro quadrado (A/m^2 , onde $A = C/s$) [18].

A densidade de força \mathbf{f} (por unidade de volume) exercida pelo campo magnético sobre a corrente é [18]:

$$\mathbf{f} = nq\bar{\mathbf{v}} \times \mathbf{B} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad (2.7)$$

Então, a força $d\mathbf{F}_m$ exercida sobre os elementos de carga no volume Adl fica definida como [18]:

$$d\mathbf{F}_m = \mathbf{j}Adl \times \mathbf{B} \quad (2.8)$$

Reorganizando a equação anterior e integrando-se para um comprimento qualquer, pode-se escrever a força magnética \mathbf{F}_m atuante em um trecho do fio em função da corrente elétrica i [18]:

$$\mathbf{F}_m = \int i d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (2.9)$$

2.1.4 Indutores e Indutância

Quando uma corrente elétrica percorre uma bobina helicoidal (solenóide), um campo magnético é criado em seu interior. Cada um dos enrolamentos da bobina é responsável pela criação do campo \mathbf{B} e, conseqüentemente, do fluxo Φ_B . Diz-se, então, que o solenoide é um indutor de campo magnético [17, 18].

Uma grandeza que deve ser analisada em indutores é a indutância. Em outras palavras, ela avalia a quantidade de fluxo magnético por unidade de corrente. Dessa forma, supondo um solenoide de N espiras, sua indutância será dada por:

$$L = N \frac{\Phi_B}{i} \quad (2.10)$$

onde a unidade de L no SI é o **Henry** (H) [17, 18].

2.1.4.1 Dedução do Gradiente de Indutância

O gradiente de indutância é a medida da indutância por unidade de comprimento. A importância dessa grandeza está relacionada a transformação da corrente elétrica em força eletromagnética. Para entender melhor seu conceito, será avaliada a força de Lorentz que atuaria em uma armadura realizando conexão entre dois fios condutores semi-infinitos, conforme mostra a figura 11 [4, 19].

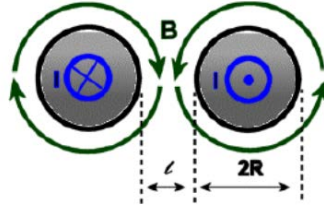


Figura 11 – Campo magnético induzido por trilhos de seção circular [4].

Os fios condutores possuem raio R e estão posicionados a uma distância l , equivalente ao comprimento de alguma armadura. Para calcular a força de Lorentz, recorre-se à equação 2.5 que é substituída em 2.11, de forma a realizar a integral para ambos os fios [4].

$$F_m = \frac{\mu_o i^2}{4\pi} \int_R^{R+l} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2R+l-x} \right) dx \quad (2.11)$$

Efetuada-se a integração, obtem-se:

$$F_m = \frac{\mu_o i^2}{4\pi} \ln \left[\frac{(R+l)^2}{R^2} \right] \quad (2.12)$$

A quantidade de energia do sistema fica acumulada no campo magnético e, em seguida é transferida para a cinemática da armadura. A energia acumulada, que será convertida no trabalho de deslocamento da armadura pode ser calculada como [17, 18]:

$$U_B = W_B = \frac{1}{2} L i^2 \quad (2.13)$$

A força F_m que atua sobre a armadura pode ser encontrada a partir da derivação do trabalho em relação ao deslocamento [19]. Dessa forma:

$$F_m = \frac{\partial W_B}{\partial x}(x, i)|_i = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) |_i = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} i^2 \quad (2.14)$$

O termo dL/dx é o gradiente de indutância desejado, podendo ser obtido através de comparação das equações 2.12 e 2.14 [4]. Portanto:

$$L' = \frac{dL}{dx} = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left[\frac{(R+l)^2}{R^2} \right] \quad (2.15)$$

2.1.4.2 Gradiente de Indutância pelo Método de Kerrisk

O método de Kerrisk foi desenvolvido no laboratório nacional de Los Alamos (EUA), sendo amplamente utilizado para encontrar o gradiente de indutância. Essa metodologia é utilizada em trilhos de seção retangular, observando-se parâmetros como distância entre os trilhos e suas dimensões [20]. A expressão para L' desenvolvida por Kerrisk é:

$$L' = [A + B \ln(1 + a_1(\frac{w}{h}) + a_2(\frac{w}{h})(\frac{s}{h}))] \ln(b_1 + b_2(\frac{s}{h}) + b_3(\frac{w}{h}) + b_4(\frac{s}{h})(\frac{w}{h})) \quad (2.16)$$

onde w é a largura dos trilhos, h seu comprimento e s a distância entre ambos. Os demais parâmetros seguem conforme a tabela. 1

Tabela 1 – Parâmetros de Kerrisk [20].

Parâmetros de Kerrisk	
A	0.4406410
B	-0.0777133
a_1	3.397143
a_2	-0.0660307
b_1	1.007719
b_2	2.743651
b_3	0.0220931
b_4	0.2637392

2.1.5 Gradiente de Resistência

Analogamente à indutância, os trilhos terão um gradiente de resistência que indica o quanto varia a resistência elétrica de acordo com o comprimento de trilho, medido do início do trilho até a posição da armadura. Para um único trilho, de seção transversal de área $A = hw$, como o da figura 12, e tendo conhecimento da resistividade ρ ($\Omega.m$) do material, o gradiente de resistência R' (Ω/m) é obtido pela equação 2.17 [17, 18].

$$R' = \frac{\rho}{hw} \quad (2.17)$$

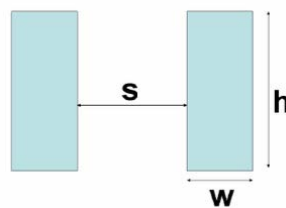


Figura 12 – Vista em corte dos trilhos de seção retangular [20].

2.2 Modelagem do Experimento

Para a modelagem deste estudo inicial sobre o canhão eletromagnético, utilizou-se uma abordagem elétrica. A abordagem em circuitos é mais indicada para prever o desempenho geral e realização de otimizações e melhoria da eficiência, já que é mais explícita e menos complexa que o método por elementos finitos, por exemplo [19].

2.2.1 Circuito Básico do Canhão Eletromagnético

A figura 13 mostra um esquema simplificado de um canhão elétrico, onde ele é acionado por um banco de capacitores com uma tensão inicial V_0 . Os dois diodos possuem a finalidade de proteger o banco de capacitores, principalmente no momento em que a armadura já não está mais entre os trilhos e ainda há carga nos capacitores. O indutor L_0 alonga o pulso de corrente, impedindo mudanças repentinas em seu valor, evitando danos ao circuito. O circuito de excitação é conectado ao canhão elétrico pelos pontos a e b . Conforme a corrente flui através dos trilhos, haverá uma queda de tensão entre esses dois pontos, parte devido à queda de tensão de resistência nos trilhos e na armadura e em parte devido à queda de tensão na indutância do trilho (V_L) [19].

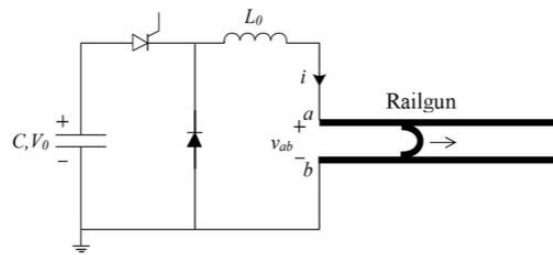


Figura 13 – Circuito Elétrico do Lançador Eletromagnético [19].

Dessa forma, a tensão V_{ab} fica:

$$V_{ab} = (R_{trilhos} + R_{armadura})i(t) + V_L \quad (2.18)$$

sendo a tensão no indutor dada por:

$$V_L = \frac{d[Li(t)]}{dt} = L(t)\frac{di(t)}{dt} + \frac{dL(t)}{dt}i(t) \quad (2.19)$$

Como a indutância e a resistência dos trilhos variam de acordo com a posição da armadura ao longo dos trilhos, é possível reescrever esses parâmetros em função da posição $x(t)$ da armadura e de seus respectivos gradientes ($R = R'x(t)$ e $L = L'x(t)$). A equação 2.18 fica [19]:

$$V_{ab} = (R'x(t) + R_{armadura})i(t) + L'x(t)\frac{di(t)}{dt} + L\frac{dx(t)}{dt}i(t) \quad (2.20)$$

O circuito elétrico todo pode ser visto na figura 14. Nele constam, o indutor L_o ; a resistência R_o , que engloba as resistências da armadura e do circuito; e os parâmetros dos trilhos em função da posição $x(t)$ da armadura.

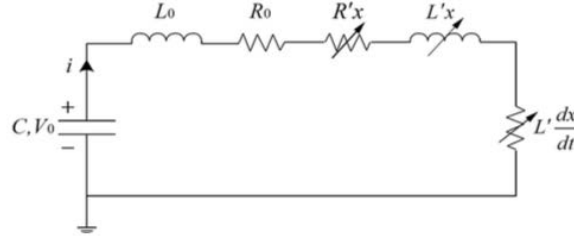


Figura 14 – Representação em circuito elétrico dos trilhos e armadura [19].

2.2.2 Equacionamento e Modelagem do Circuito Elétrico

O railgun é um sistema eletromecânico, tanto a parte elétrica quanto a mecânica devem ser consideradas, juntamente com as condições de contorno. As condições elétricas iniciais são a tensão inicial dos capacitores e a corrente inicial. Para a parte mecânica as condições são a posição e velocidade [19]. Então:

$$\begin{aligned}
 V_c(t = 0) &= V_0 \\
 i(t = 0) &= I_0 = 0 \\
 x(t = 0) &= x_0 \\
 \frac{dx(t = 0)}{dt} &= v_0
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Aplicando a lei de Kirchhoff ao circuito da figura 14, é possível encontrar as equações diferenciais que governam o railgun:

$$-V_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + L_0 \frac{di(t)}{dt} + R_0 i(t) + R'x(t)i(t) + L'x(t) \frac{di(t)}{dt} + L' \frac{dx(t)}{dt} i(t) = 0 \tag{2.22}$$

cuja derivada temporal é dada pela equação :

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} (L_0 + L'x(t)) + \frac{di(t)}{dt} (R_0 + R'x(t) + 2L' \frac{dx(t)}{dt}) + i(t) \left(\frac{1}{C} + R' \frac{dx(t)}{dt} + L' \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \right) \tag{2.23}$$

Percebe-se que os termos da equação diferencial e segunda ordem não linear em duas variáveis $i(t)$ e $x(t)$ necessitam de mais um parâmetro para sua solução e outro para transformação em um sistema de equações de primeira ordem, além dos já apresentados em 2.21. Eles são $di(0)/dt$ e d^2x/dt^2 . Aplicando-se as equações 2.21 em 2.22 encontra-se $di(0)/dt$. O parâmetro em falta pode ser extraído de 2.14 [19]. Logo:

$$\begin{aligned}\frac{di(0)}{dt} &= \frac{V_0}{L_0 + L'x_0} \\ \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{L'}{2m}i^2(t)\end{aligned}\tag{2.24}$$

Após todos os passos detalhados até aqui, pode-se, finalmente, determinar as equações de estado que ervem de base para a modelagem numérica. As equações de estado, apresentadas em 2.25, foram ilustradas no diagrama de blocos da figura 15, de onde foi elaborada a modelagem em ambiente *simulink* [®], comentada em [19]. A partir da modelagem, foram gerados três gráficos em função do tempo: corrente $i(t)$, velocidade da armadura $v(t)$ e força na armadura $F(t)$; conforme as figuras 16a, 16b e 16c. As especificações para a geração desses gráficos segue conforme a tabela 2 [19].

$$\begin{aligned}i(t) &= \frac{1}{L_0 + L'x(t)}[V_c(t) - (R_o + R'x(t) + L'\frac{dx(t)}{dt})i(t)] \\ \dot{V}_c(t) &= -\frac{i(t)}{C} \\ \dot{x}(t) &= \frac{dx}{dt} \\ \frac{d\dot{x}(t)}{dt} &= \frac{L'}{2m}i^2(t)\end{aligned}\tag{2.25}$$

Tabela 2 – Especificações para a simulação numérica [19].

Parâmetros	
C	12 F
V_0	7 kV
L_0	1 μ H
R_0	0.5 m Ω
m	20 kg
v_o	70 m/s
R'	4.18 $\mu\Omega/m$
L'	0.94 $\mu H/m$

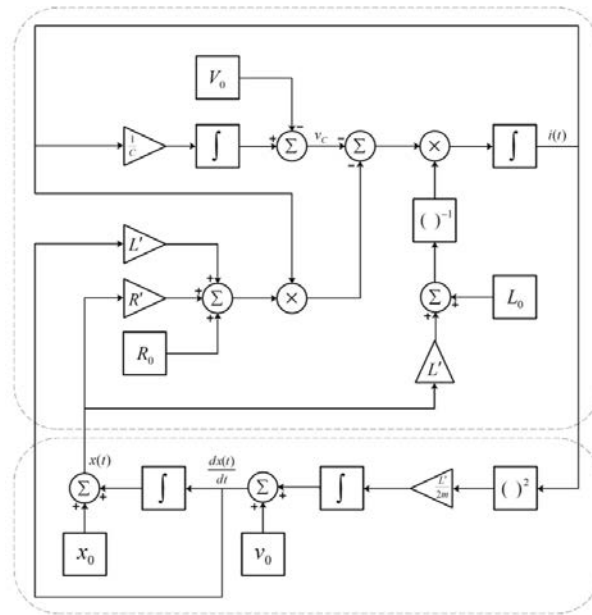


Figura 15 – Diagrama de blocos utilizado em *simulink*® [19].

Observa-se que a corrente tem um crescimento exponencial no início, atingindo um máximo e, em seguida, há decaimento suave significativo. Por sua vez, a velocidade da armadura possui um crescimento suave no início, com incrementos crescentes, continuando a crescer após a corrente ter alcançado seu valor máximo, porém com incrementos decrescentes a partir de $t = 2 \text{ ms}$. Já a força magnética, por ser proporcional ao quadrado da corrente elétrica, apresenta um comportamento análogo ao da corrente elétrica.

2.3 Resultados Obtidos e Discussão

As equações de estado de 2.25, juntamente com os dados tabela 2, permitem a verificação dos resultados obtidos por [19]. Dessa forma, foi realizado em ambiente *simulink*® uma modelagem análoga à vista na figura 15, cujo objetivo é ratificar os resultados anteriores para seguir com o desenvolvimento do projeto físico.

A figura 17 representa a modelagem concebida que corroborou com os resultados anteriores. As figuras de 18a a 18c são os gráficos obtidos pela referida modelagem, adotando-se passo variável para o tempo e a opção automático na escolha do método numérico.

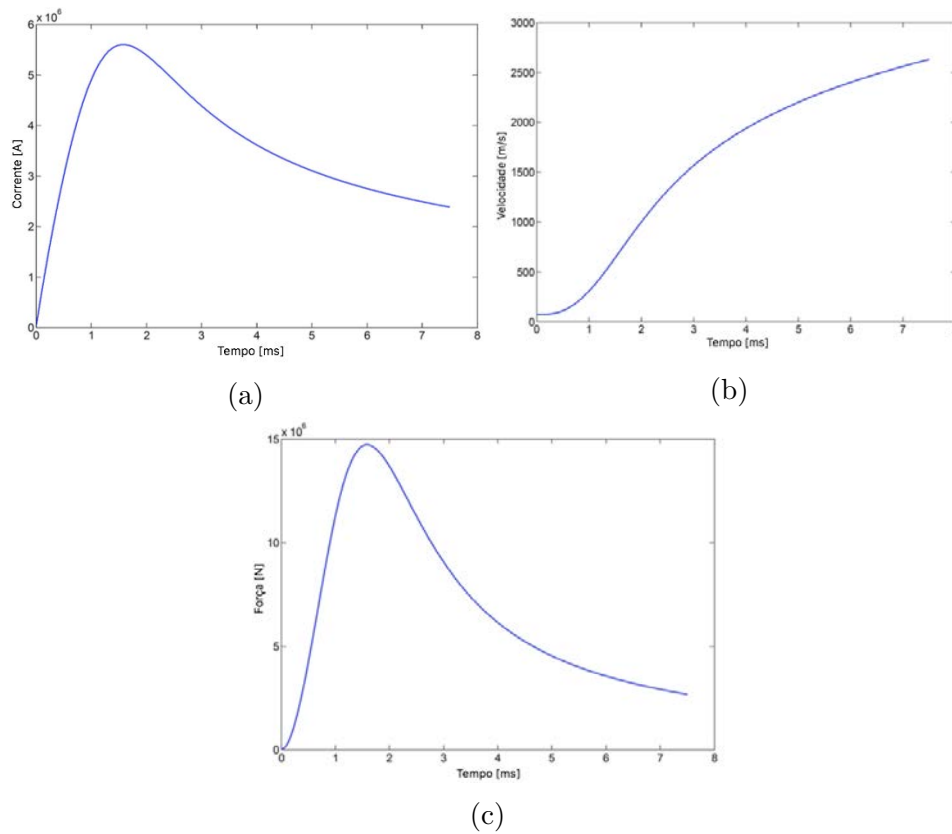


Figura 16 – Gráfico de variáveis relativas ao tempo: a) corrente, (b) velocidade e (c) força [19]

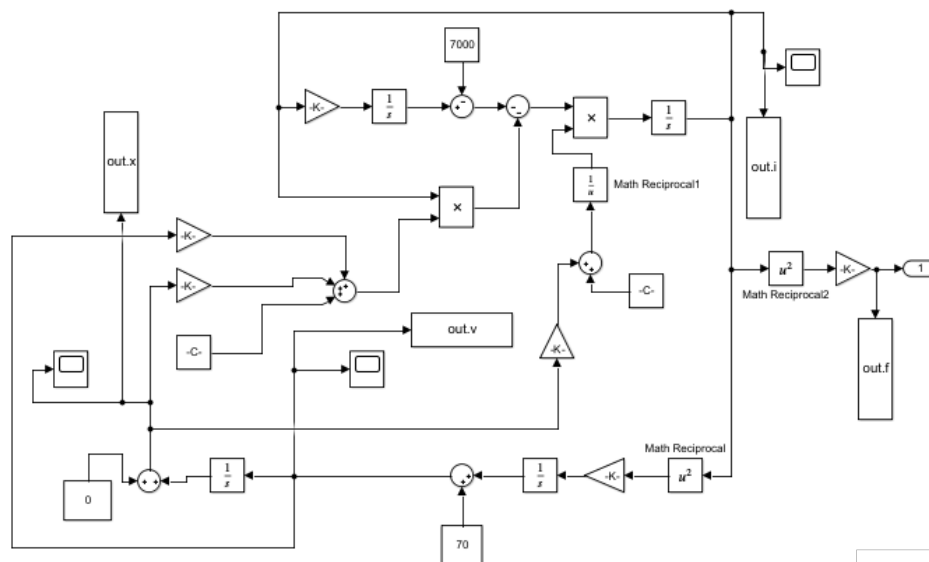


Figura 17 – Modelagem em *simulink*® das equações de estado.

Observa-se que os gráficos gerados apresentam fidelidade qualitativa e quantitativa quando comparados aos encontrados em [19], possibilitando ratificação da metodologia e prosseguimento às próximas etapas deste trabalho.

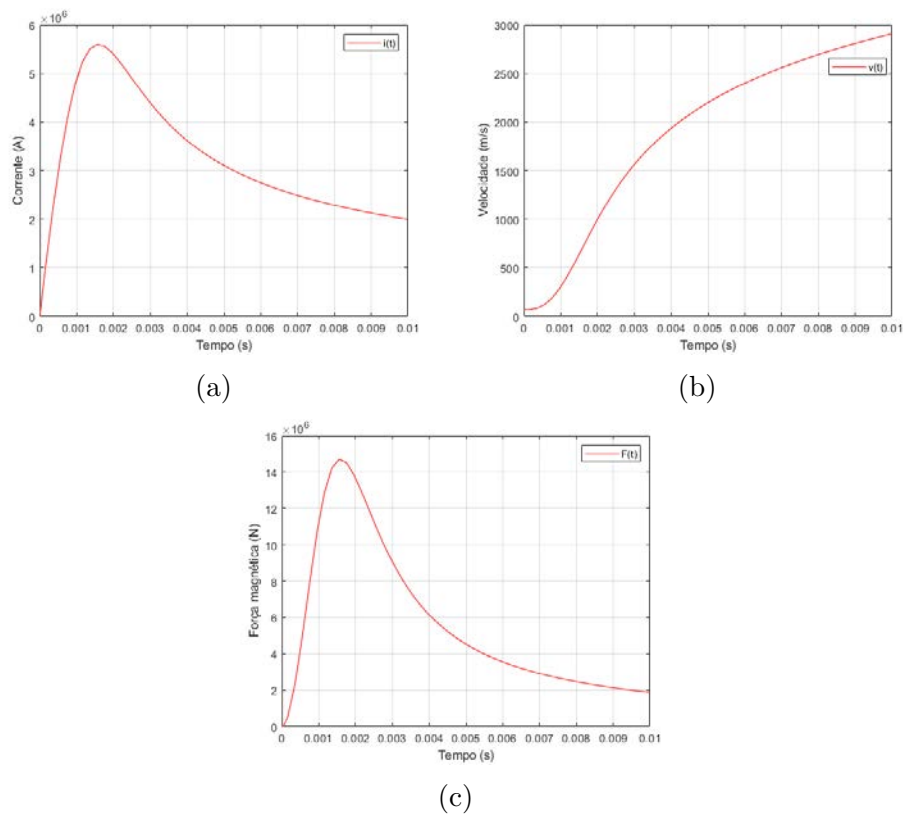


Figura 18 – Reprodução dos gráficos apresentados por [19]: (a) corrente, (b) velocidade e (c) força

2.4 Modelagem para o Experimento

Para verificação do fenômeno da propulsão eletromagnética, usca-se realizar um levantamento das possíveis dimensões que o aparato experimental teria, bem como sua montagem. Dessa forma, um modelo em ambiente virtual *Solidworks*[®] elaborado. A figura 19a apresenta o aparato experimental onde constam: uma bateria veicular, um disjuntor para evitar danos à bateria, dois trilhos tubulares de cobre eletrolítico e a armadura em alumínio. A geometria da armadura adaptada para haver um melhor contato elétrico com os trilhos. Portanto, pta-se por um formato bicôncavo, como apresentado na figura 19b. Cabe destacar que os capacitores foram suprimidos da modelagem em detrimento da utilização da bateria veicular como fonte de tensão.

Para aproximar o comportamento da bateria ao do capacitor modelado na simulação, foi realizado o acréscimo de uma resistência no circuito elétrico (computada em R_o), e estipulada uma alta capacitância para tornar o decaimento de tensão muito baixo. O valor dessa capacitância foi encontrado igualando-se a carga armazenada em uma bateria de $60Ah$ (ou $216.000C$) à carga armazenada em um capacitor de $12V$ em seus terminais. As demais resistências de fios e conexões também foram adicionadas em R_o .

Como não foram realizadas medições através sensores ou aparelhos, os parâmetros L_o e R_o foram estimados. O gradiente de resistência dos trilhos e a resistêcia da armadura

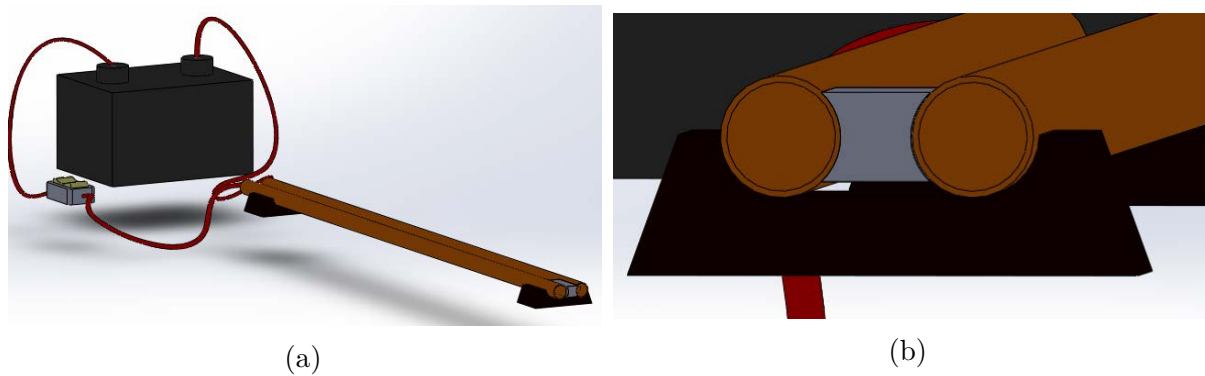


Figura 19 – Aparato experimental

foram calculados tomando por base a resistividade de seus elementos; $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ para o cobre e $2,82 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ para o alumínio [21]. Por sua vez, o gradiente de indutância dos trilhos foi calculado de acordo com a equação 2.15. A massa da armadura foi obtida através de uma densidade aproximada de $2,7 \text{ g/cm}^3$ [22]. Dessa forma, os dados para a simulação numérica são os valores descritos na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros estimados para a simulação numérica

Dimensões dos trilhos	
comprimento	900 mm
diâmetro externo	19,05 mm
espessura	1,00 mm
distância dos trilhos (s)	11 mm, 22mm, 33mm
Dimensões da armadura	
diâmetro da concavidade	19,05 mm
comprimento	50 mm
altura (h)	17 mm
largura (w)	14 mm
Demais grandezas	
C	18 kF
V_0	12 V
L_0	$10 \mu\text{H}$
R_0	$0,07 \Omega$
R'	$78,64 \mu\Omega/m$
L'	$0,25 \mu\text{H}/m$
m	25 g
v_o	0 m/s
x_o	100 mm

Inicialmente, busca-se verificar o comportamento da força magnética de acordo com cada uma das distâncias l entre os trilhos. A figura 20a apresenta três curvas, uma curva para cada distância l estipulada. Assim, observa-se que com o aumento dessa distância, há decaimento na força magnética. Isso ocorre porque o campo magnético gerado pelo trilho

se enfraquece à medida que se distancia do mesmo, fato comprovado pela equação 2.4. Na figura 20b, observa-se o comportamento da força magnética de acordo a distância entre trilhos. Verificado esse comportamento, fixou-se a distância l em 11mm, prosseguindo com as demais análises.

As figuras de 21a a 21c apresentam, respectivamente, o comportamento da corrente elétrica, velocidade e força magnética que atuam na armadura a partir da modelagem apresentada na figura 17 ao se utilizar os dados da tabela 3 para a distância l de 11mm. Observa-se que a corrente elétrica apresenta um pico quase que instantâneo, mantendo-se constante em aproximadamente 170A. Para entender esse comportamento é preciso notar que, enquanto a armadura avança sobre os trilhos, acréscimos de resistência são introduzidos ao circuito elétrico. Entretanto, tais acréscimos são pouco significativos quando comparados às resistências do próprio circuito (bateria, conexões elétricas e armadura), conforme é possível verificar na tabela 3, cujo gradiente de resistência R' está na faixa dos micro-Ohms para cada metro de trilho. O comportamento da força magnética (e da aceleração na armadura) reflete a proporcionalidade com o quadrado da corrente no circuito, conforme mostra a equação 2.24. Observando-se uma força constante, o comportamento da velocidade deve ser uma função linear, conforme apresentado na figura 21b. Para um melhor entendimento do comportamento da armadura, um gráfico de seu deslocamento foi adicionado, figura 21d, onde apresenta um avanço de 8cm no primeiro segundo.

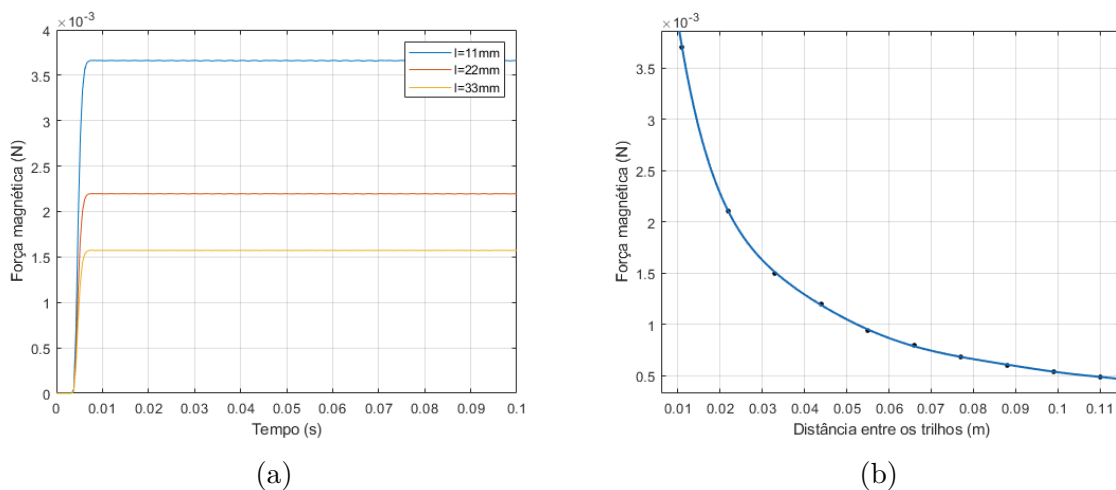


Figura 20 – Comportamento da força magnética de acordo com: a) o tempo, (b) distância entre os trilhos

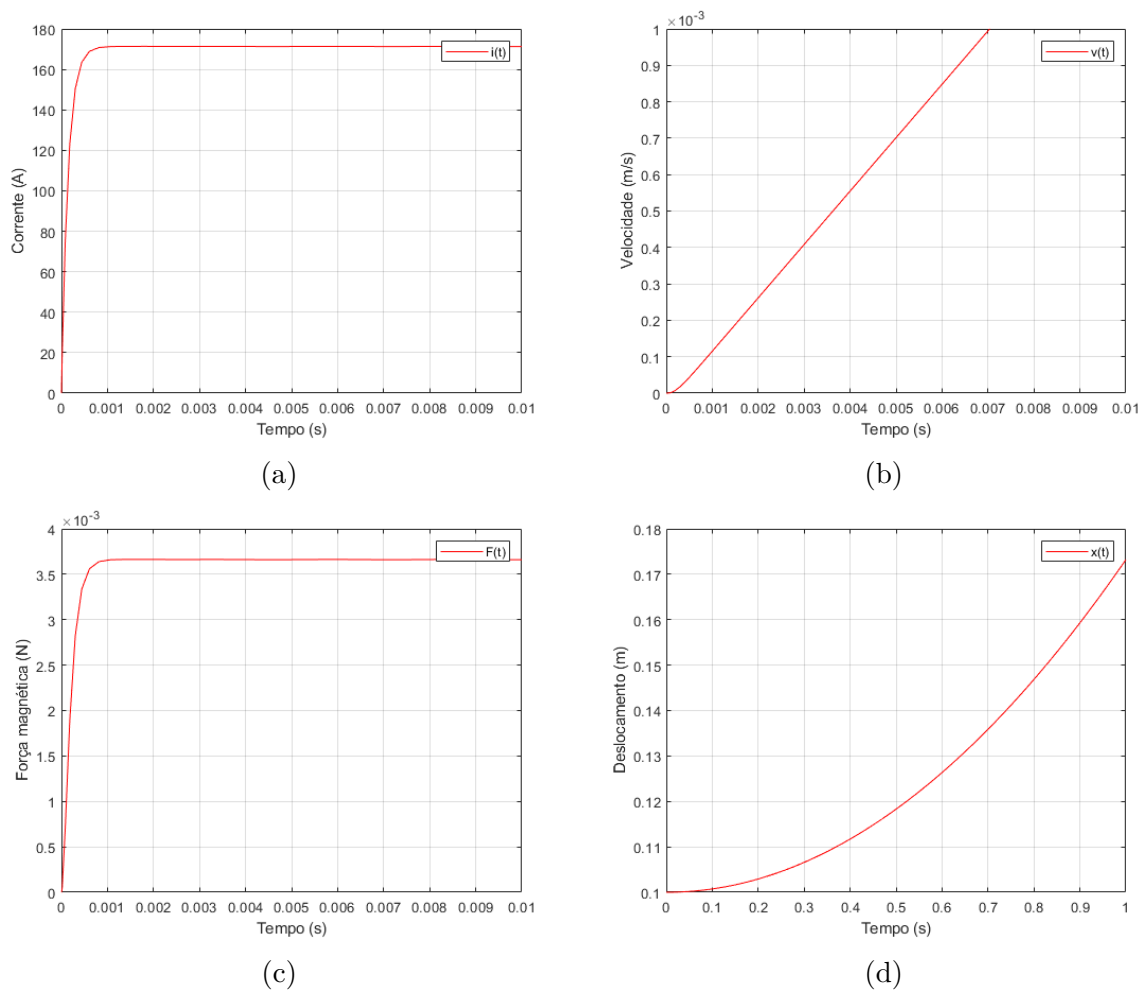


Figura 21 – Gráfico de variáveis relativas ao tempo a partir dos dados da tabela 3: (a) corrente, (b) velocidade e (c) força (d) deslocamento

2.5 Execução do Experimento

Para a execução do experimento, foram utilizados dois tubos de cobre eletrolítico de cerca de 600 mm de comprimento. Ambos foram perfurados e fixados através parafusos e porcas a uma plataforma metálica. Para que a plataforma não funcionasse como um aterramento, buchas plásticas foram utilizadas para encapsular os parafusos, impedindo passagem de corrente à plataforma. A conexão com a bateria foi realizada com cabos elétricos e garras do tipo "jacaré". Além disso, foi modelado e impresso um modelo de foguete balístico de campanha para que fixado à armadura que pretendia-se utilizar. Porém, antes de realizar a usinagem da armadura com a geometria proposta, buscou-se verificar o comportamento do aparato utilizando objetos metálicos para fechar o circuito, simulando uma armadura, visando economizar recursos. Foram realizados, ao todo, cinco testes: o primeiro em uma oficina de automóvel; um segundo teste na garagem do IME; dois testes no laboratório de eletrônica básica do IME; e, por fim, um teste com utilização de um capacitor.



Figura 22 – Foguete de campanha com empenas impresso.

No primeiro teste, um tubo cilíndrico de alumínio foi colocado sobre os trilhos, buscando-se verificar se haveria passagem de corrente e movimento do tubo. Após serem realizadas as conexões com a bateria de 12V (Volts) e ligar o disjuntor, nenhum tipo de movimento foi observado no tubo. Entretanto, ao movimentar o cilindro com um bastão plástico, pôde-se notar o aparecimento de faíscas pelos pontos de contato entre os trilhos e o tubo, o que configura passagem de corrente elétrica no circuito, confirmado pelo fato de que os cabos ficavam levemente aquecidos. Além disso, notou-se que, quando havia passagem de corrente pelo circuito, deslocar o tubo de alumínio através de um impulso externo era mais difícil, pois uma atração entre os trilhos e o tubo na direção transversal ao deslocamento do tubo surgia, freando o deslocamento do tubo.

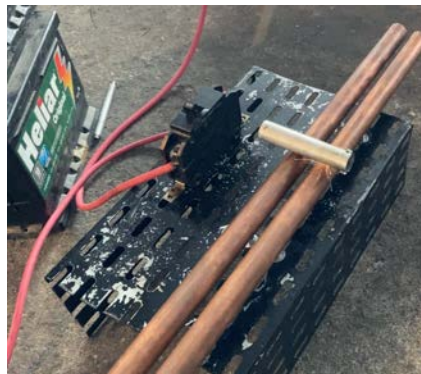


Figura 23 – Teste com tubo de alumínio .

Após o primeiro teste, imaginou-se que o motivo de não haver movimentação seria decorrente da baixa tensão adotada e do peso do cilindro de alumínio. Assim, em um segundo teste, duas baterias foram conectadas em série, gerando um total de 24V e, para fazer a função de armadura, um pedaço de fio de cobre foi posto sobre os trilhos. Iniciada a circulação de corrente no circuito, as observações foram análogas ao do primeiro teste. Não havendo sequer vibração do fio de cobre.



Figura 24 – Teste com fio de cobre.

Para o terceiro teste realizado no laboratório, utilizou-se uma fonte de tensão limitada a 30V que permitia apenas a produção de uma corrente elétrica de 6A. Adotou-se uma haste de aço, similar a uma agulha, de forma que possibilitasse mais redução de peso, sem comprometer a condutividade elétrica. Foram feitas medições para a resistência dos trilhos e da haste metálica, encontrando-se cerca de $0,17 \Omega$ para todo o comprimento de cada trilho e $0,16 \Omega$ para a haste de metal. Apesar do procedimento adotado, o resultado foi exatamente o descrito no primeiro teste: não houve nenhuma movimentação da haste metálica e, além disso, surgia uma força atrativa entre os trilhos e a haste metálica, mantendo a haste grudada aos mesmos.

No penúltimo teste, realizado em laboratório, um conjunto de seis ímãs de neodímio foi usado para gerar um campo magnético externo. Já que a corrente era limitada a 6A, imaginou-se que, com os ímãs, o efeito de propulsão ocorreria. Os ímãs foram dispostos lado a lado no vão central abaixo dos trilhos, todos com o mesmo sentido de polarização. Após iniciar a circulação de corrente, percebeu-se que a haste metálica sofria poder de atração pelos ímãs, sendo logo freado, concluindo-se que a força de Lorentz era incapaz de mover a haste. Dessa forma, percebeu-se que era necessário a utilização de um conector elétrico que não fosse ferromagnético. Na ausência de material apropriado, um grafite de lapiseira foi usado como conector entre os trilhos e os ímãs foram acoplados entre si para potencializar o campo magnético. Posicionando os ímãs abaixo do grafite e ligando-se o circuito, foi possível observar movimentação do grafite nas imediações do campo magnético, comprovando a ocorrência da força de Lorentz.

No último teste, um capacitor de 250 V e $1000 \mu\text{F}$ foi conectado ao circuito, com intuito de avaliar a descarga de corrente em um tempo de resposta menor na propulsão de um material ferromagnético. Para tal, um balim (esfera de aço de pequeno diâmetro) foi utilizado como armadura. Além disso, foi verificada a composição química dessa esfera

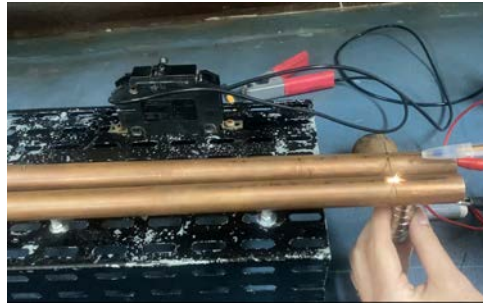


Figura 25 – Teste com grafite.

maciça pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Nele, o balim foi exposto à luz de radiação, retornando um espectro característico que pode ser comparado com o espectro de materiais existentes, conforme a figura 26. Nota-se que o balim contém em sua composição, especialmente: ferro, carbono, manganês, silício e outros. A fração de sua composição pode ser verificada na figura 27, sendo: 92,73% de ferro, 3,39% de carbono, 1,91% de manganês, 1,38% de oxigênio, por exemplo.

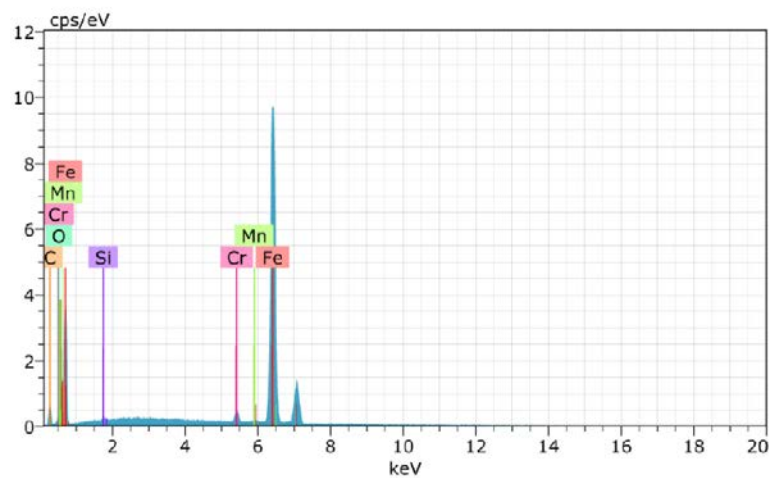


Figura 26 – Espectro característico do balim.

O capacitor funcionava ligado a uma placa eletrônica, que limitava a corrente a 5A. O balim era posto em movimento sobre os trilhos sendo, em seguida, realizada a descarga do capacitor. Observou-se que, imediatamente após a descarga, o balim era freado. Após inspeção do balim, notou-se que toda sua superfície estava com pontos de solda. Assim, pode-se concluir que a aderência vista nos testes anteriores era causada pela elevação brusca de temperatura no sistema. A pequena superfície de contato entre os trilhos e o metal de conexão proporcionava uma elevada resistência elétrica que aumentava significativamente a temperatura, atuando como um ponto de solda. Danificando os metais e gerando a aderência indesejada.

Spectrum: 51

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	4.04	3.39	13.86	0.80
O	8	K-series	0.54	0.45	1.38	0.16
Si	14	K-series	0.17	0.14	0.25	0.04
Cr	24	K-series	1.64	1.38	1.30	0.08
Mn	25	K-series	2.27	1.91	1.71	0.10
Fe	26	K-series	110.39	92.73	81.50	2.97
Total:			119.05	100.00	100.00	

Figura 27 – Composição percentual do balim.

Em virtude do insucesso nos testes realizados, buscou-se uma alternativa à utilização de trilhos para realizar a propulsão eletromagnética. Dessa forma, os trilhos de cobre foram conectados a um solenóide que envolvia um tubo de policloreto de vinila (PVC) e conectados a uma bateria de carro de 12V, figura 28. Este sistema experimental é baseado no conceito do funcionamento de um coil gun, conforme ilustra a figura 29. O princípio de funcionamento desse sistema caracteriza-se por estabelecer uma corrente em cada espira do solenóide, produzindo uma força de atração sobre um material ferromagnético através do campo magnético gerado em seu interior. No teste, o balim foi posto no interior do tubo de PVC, nas proximidades do enrolamento. Após o ligar do disjuntor, observou-se que o balim era acelerado em direcção ao interior do tubo, validando o fenômeno.

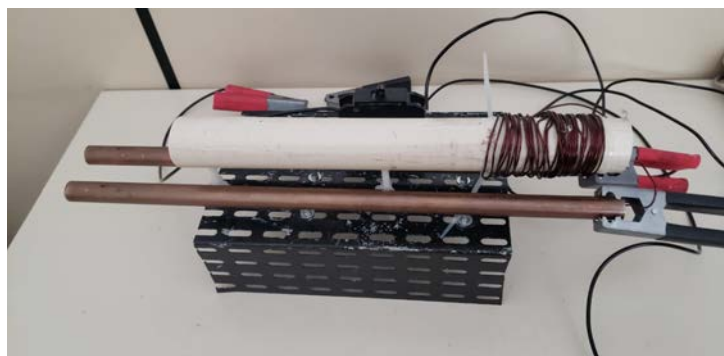


Figura 28 – Teste de um coilgun.

A velocidade do balim pode ser determinada ao serem analisadas as forças consti-

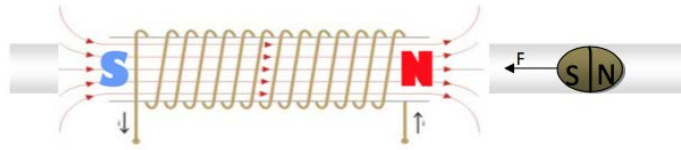


Figura 29 – Campo magnético do solenóide atraindo o balim.

tuintes da dinâmica de seu movimento, conforme figura 30. Essas forças podem ser escritas por parâmetros mensuráveis descritos na expressão 2.27. Sendo ρ_{ar} , a massa específica do ar; A , área molhada da esfera de aço; C_d , o coeficiente de arrasto da esfera; μ_d , coeficiente de atrito dinâmico entre a esfera e o material onde percorre; m a massa; W o peso; V a velocidade; e a a aceleração da esfera.

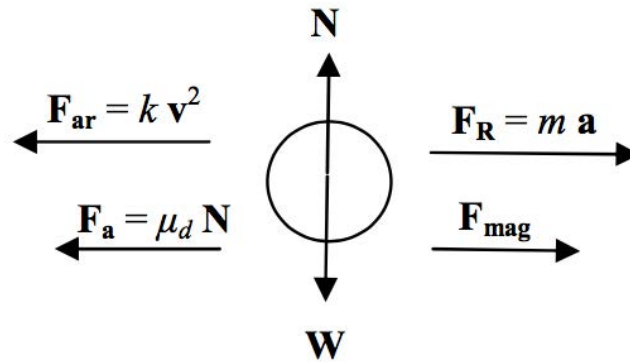


Figura 30 – Forças atuantes no balim.

$$\mathbf{F}_{mag} - \mathbf{F}_{ar} - \mathbf{F}_a = \mathbf{F}_R \quad (2.26)$$

$$F_{mag} - \frac{1}{2}\rho_{ar}AC_dV^2 - \mu_dW = ma \quad (2.27)$$

Para ter a iminência do seu deslocamento, a partir do repouso, a força magnética atuante no balim precisa vencer as forças de atrito estático e de arrasto que impedem seu movimento. Porém, a força de arrasto é proporcional ao o coeficiente de arrasto da esfera, C_d que, por sua vez, depende do formato (geometria) do corpo e do número de Reynolds, Re . Como a configuração do teste se encontra na iminência do movimento, pode-se estimar que a força de arrasto é nula, pois Re tende a zero. Assim sendo, a força magnética atuante no balim precisa vencer somente a força de atrito estático. Supondo o balim realizando seu deslocamento sobre os trilhos de cobre, cujo coeficiente de atrito estático, μ_e , é de 0,6; e a massa do balim é cerca de 70 g, a força magnética mínima ao deslocamento fica: $F_{mag} = \mu_e mg$. Considerando-se a expressão anterior onde a aceleração da gravidade, g , seja de $9,81 \text{ m/s}^2$, a força magnética necessária ao início do deslocamento é de cerca de

0,4 N. Percebe-se que essa força é bem superior aos 3,6 mN encontrados na simulação numérica anterior, conforme figura 21c.

2.6 Análise dos Resultados

A falha na execução dos testes revela, sem dúvidas, a necessidade de aprimoramento do experimento. Alguns fatores para o insucesso do projeto podem ser enumerados. Primeiramente, é preciso destacar que a simulação numérica não leva em consideração forças resistivas que, naturalmente, estão presentes no experimento. A inércia da armadura, forças de atrito e a aderência gerada pela fusão dos metais também não são consideradas na simulação, uma vez que se trata de um estudo inicial desse fenômeno. Além disso, cabe destacar que, embora se consiga simular o movimento da armadura através da metodologia empregada, a ordem de grandeza da força eletromagnética é de 4 mN e, certamente, essa força é bem inferior à força de atrito estática existente nos trilhos. Deve-se notar, também, que as resistências reais são maiores que as adotadas na simulação numérica (tabela 3), conforme os $0,17 \Omega$ dos trilhos e $0,16 \Omega$ da haste metálica. Acrescente-se a isso a limitação de corrente elétrica em cerca de 6A das fontes de tensão, logo, a força magnética torna-se menor que o simulado e, portanto, longe do necessário.

Como sugestão para continuidade dos experimentos no railgun, propõe-se: redução dimensional dos componentes utilizados, visando diminuição de custos do projeto; trilhos não tubulares, preferencialmente de seção quadrada para simplificar a geometria da armadura; implementação de um capacitor (ou um banco de capacitores) de forma a produzir uma descarga apropriada de corrente; utilização de um circuito elétrico/eletrônico capaz de permitir segurança e manutenção dos componentes e, por fim, uma armadura que tenha uma superfície de contato grande com os trilhos. Ademais, uma alternativa frente às dificuldades encontradas para a propulsão do railgun seria a opção pelo uso de solenóides, o coilgun. Onde é necessário menos energia para propulsão.

3 CONCLUSÃO

Foi apresentado um estudo fenomenológico de um canhão eletromagnético sobre trilhos paralelos de tubos de cobre para entendimento da propulsão magnética de um material sólido inerte (projétil). Não obstante, foi proposto um equacionamento desta propulsão eletromagnética para um projétil com solução realizada pelo programa Simulink do MATLAB[®]. Também foram realizadas simulações numéricas relativas a este fenômeno elétrico com a utilização de uma bateria comum de automóvel, a partir das equações propostas, cuja solução foi realizada em Simulink do MATLAB[®]. Além disso, foi elaborado um experimento, descrevendo seu funcionamento, para que fosse comparado com a teoria descrita. Durante os testes realizados, não foi possível observar o correto funcionamento do experimento. Assim, foram feitas sugestões de melhoria no experimento, bem como de alternativas para a execução da propulsão eletromagnética.

REFERÊNCIAS

- 1 XIE, H. bien; YANG, H. ya; YU, J.; GAO, M. yu. Research progress on advanced rail materials for electromagnetic railgun technology. *Defence Technology*.
- 2 HARRIS, W. *How Rail Guns Work*. 23 jul. de 2021, year = 2021. Disponível em: <<https://science.howstuffworks.com/rail-gun1.htm>>.
- 3 ENGEL, T. G.; TIMPSON, E. J. A general theory of dc electromagnetic launchers. *Journal of Applied Physics*, v. 118, 2015. 26 mar. de 2021. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4928809>>.
- 4 ÇEVİK, Y. *Modeling of an Electromagnetic Launcher*. 72 p. Master of Science in Electrical and Electronics Engineering Department — Middle East Technical University, Turkey, 2015. 20 fev 2021. Disponível em: <<https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12619613/index.pdf>>.
- 5 HUNDERTMARK, S.; VINCENT, G.; SIMICIC, D. Developing a launch package for the pegasus launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1612.04143.pdf>>.
- 6 SERVICE, C. R. *Navy Lasers, Railgun, and Hypervelocity Projectile: Background and Issues for Congress*. 2017. 31 mar. de 2021. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1030345.pdf>>.
- 7 SYSTEMS, B. *Hypervelocity Projectile*. 2020. 31 mar. de 2021. Disponível em: <<https://www.baesystems.com/en/product/hyper-velocity-projectile-hvp>>.
- 8 CNBC. *China just tested the world's most powerful naval gun, and US intelligence says it will be ready for warfare by 2025*. 2019. 31 mar. de 2021. Disponível em: <<https://www.cnbc.com/2019/01/30/china-naval-gun-ready-for-warfare-by-2025-us-intelligence.html>>.
- 9 POST, N. *Turkish Indigenous Rail Gun “Şahi-209” to be Integrated to Naval Assets*. 2019. 31 mar. de 2021. Disponível em: <<https://navalpost.com/turkish-indigenous-rail-gun-sahi-209-to-be-integrated-to-naval-assets/>>.
- 10 SECURITY, E.; DEFENCE. *Disruptive Research for Electromagnetic Railgun*. 2019. 31 mar. de 2021. Disponível em: <<https://euro-sd.com/2020/06/news/17568/disruptive-research-for-electromagnetic-railgun/>>.
- 11 MCNAB, I. R.; BEACH, F. C. Naval railguns. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 43, n. 9257989, p. 463 – 468, 2007.
- 12 STEFANI, F.; PARKER, J. Experiments to measure gouging threshold velocity for various metals against copper. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 35, n. 6150815, p. 312 – 316, 1999.
- 13 PAVLOV, A. *Improvement of Electromagnetic Railgun Barrel Performance and Lifetime by Method of Interfaces and Augmented Projectiles*. 131 p. Master of Science in Aerospace Engineering — Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2013. 31 mar. de 2021. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/19159908.pdf>>.

- 14 TANG, B.; XU, Y.; LIN, Q.; LI, B. Synergy of melt-wave and electromagnetic force on the transition mechanism in electromagnetic launch. *IEEE Transactions on Plasma Science*, v. 45, n. 17012930, p. 1361 – 1367, 2017.
- 15 COOPER, K. P.; JONES, H. N.; MEGER, R. A. Analysis of railgun barrel material. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 43, n. 9257916, p. 120 – 125, 2006.
- 16 DUTTA, I.; DELANEY, L.; CLEVELAND, B.; PERSAD, C.; TANG, F. Electric current induced liquid al deposition, reaction and flow on cu rails at rail-armature contacts in railguns. *14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, 2008.
- 17 HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC. v. 3.
- 18 NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher. v. 3.
- 19 TAHER, S. A.; JAFARI, M.; PAKDEL, M. A new approach for modeling electromagnetic railguns. *IEEE Transactions on Plasma Science*, v. 43, n. 5, p. 1733–1741, 2015.
- 20 KERRISK, J. Current distribution and inductance calculations for rail-gun conductors. In: *Los Alamos National Laboratory*. [S.l.: s.n.].
- 21 GERAIS, U. F. de M. *Resistividade Elétrica*. 23 jul. de 2021, year = 2021. Disponível em: <https://www.fisica.ufmg.br/ciclo-basico/wp-content/uploads/sites/4/2020/05/Resistividade_eletrica.pdf>.
- 22 SUL, U. F. do Rio Grande do. *Densidade*. 23 jul. de 2021, year = 2021. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20022/Jeferson/Densidade-1.htm>>.