



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
DIRETORIA DE ENSINO
DEPARTAMENTO DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES, LETRAS E CIÊNCIAS
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

EDWAR DÁVILA MONTENEGRO

MAGLEV: UMA NOVA POSSIBILIDADE PARA A EXPLORAÇÃO ESPACIAL

TERESINA, PIAUÍ

18 de março de 2018

EDWAR DÁVILA MONTENEGRO

MAGLEV: UMA NOVA POSSIBILIDADE PARA A EXPLORAÇÃO ESPACIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora como requisito parcial para a obtenção do diploma do Curso Superior de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. M^e. AYRTON VASCONCELOS LIMA

TERESINA, PIAUÍ

18 de março de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M111 MONTENEGRO, EDWAR DÁVILA
m MAGLEV : UMA NOVA TECNOLOGIA PARA A EXPLORAÇÃO ESPACIAL / EDWAR
DÁVILA MONTENEGRO - 2018.
62 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, Licenciatura em Física, 2018.

Orientador : Prof Me. AYRTON VASCONCELOS LIMA.

1. MAGLEV. 2. EXPLORAÇÃO ESPACIAL. 3. FOGUETES. I.Título.

CDD 530



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PIAUI

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA-CENTRAL

Diretoria de Ensino
Departamento de Formação de Professores - DFP
Coordenação de Física



FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: MAGLEV: UMA NOVA POSSIBILIDADE PARA A EXPLORAÇÃO ESPACIAL

ALUNO(A): EDWAR DÁVILA MONTENEGRO Matrícula: 20111FIS0319

DATA: 21 de março de 2018

Artigo defendido junto ao Departamento de Formação de Professores, aprovado pela Banca Examinadora:

Prof. AYRTON VASCONCELOS LIMA
Orientador e Presidente da Banca

Prof. JOÃO BOSCO DE SOUSA ALMEIDA
Membro Avaliador

Prof. ADIVALDO FERREIRA DE ALMEIDA
Membro Avaliador

Teresina, 21 de março de 2018.

A todos aqueles aventureiros que almejam pela oportunidade de explorar e conquistar novos
lugares .

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer aos cientistas e escritores Carl Sagan e Richard Dawkins, os quais com seus livros me conduziram magistralmente pelo caminho da ciência e da razão. Agradeço a meu orientador prof. Ayrton Vasconcelos, por aceitar o desafio de me orientar nessa aventura, a minha namorada Vanessa Cristina, pela paciência em me ouvir falar no mesmo assunto todos estes meses, a meu filho, por nunca reclamar da minha ausência durante o tempo que estive elaborando este trabalho, a meu amigo Francisco Peixoto, pelos bons conselhos e encorajamento que sempre me brindou, a todos meus colegas professores do Programa Cidade Olímpica educacional, a todos meus colegas e amigos da Graviton Scientific Society e em especial a todos os pesquisadores que deixaram seus trabalhos na internet com acesso livre, foi graças a eles que pude usufruir do conhecimento sobre sistemas Maglevs e foguetes, o mesmo que me permitiu esboçar este trabalho. E finalmente agradeço a todos meus professores que de uma ou outra forma colaboraram para meu crescimento acadêmico.

Wernher Von Braun disse que com seus foguetes abriu uma janela para o céu. Não entanto, a melhor maneira de chegar num lugar não é pela janela é sim pela porta e isto só será possível com o uso de sistemas Maglev.

RESUMO

Atualmente colocar cargas úteis no espaço (pessoas ou equipamento) é uma atividade economicamente impraticável para a maioria de países da Terra. O fator de custo econômico é dado pelo limite tecnológico imposto pelo desenvolvimento em Ciências de materiais e propulsores químicos, os quais permitem uma razão de massa de carga útil / massa inicial do foguete de apenas 0,05. Motivo pelo qual urge a necessidade do desenvolvimento de novos materiais ou métodos para viabilizar esta tarefa. Com base no exposto, este trabalho tem por objetivo esboçar um modelo matemático de uma lançadeira espacial usando sistemas Maglev, capaz de colocar uma carga útil de 4.725kg numa órbita de 327.000m em relação à superfície da Terra, como também comparar sua vantagem econômica em relação aos sistemas atuais de foguetes espaciais. Para elucidar as discussões levantadas neste trabalho inicialmente, será elaborada uma revisão bibliográfica sobre os novos estudos e aplicações na área de sistemas Maglev com métodos Inductrack, a partir da qual construiremos o modelo proposto aqui, usando como base os modelos e pesquisas de trens Maglev por meio da técnica inductrack descrita nas patentes de posse do Lawrence Livermore National Laboratory. conclui-se que os sistemas maglev seriam mais viáveis economicamente para a exploração do espaço, mais seguros e não poluentes ao o meio ambiente. Não entanto, existem algumas limitações tecnológicas que não permitem sua aplicação imediata.

Palavras-chaves: Maglev. Inductrack. Exploração Espacial. Foguetes Espaciais.

RESUMEN

Actualmente colocar cargas útiles en el espacio (personas o equipamentos) es una actividad económicamente impracticable para la mayoría de los países de la Tierra. El factor del precio económico se da por el límite tecnológico impuesto por el desarrollo en Ciencias de materiales y propulsores químicos, que permiten una proporción de masa de carga útil / masa inicial del cohete de sólo 0,05. Motivo por el que urge la necesidad del desarrollo de nuevos materiales o métodos para hacer viable esta tarea. Con base en lo expuesto, este trabajo tiene por objetivo esbozar un modelo matemático de una lanzadera espacial usando sistemas Maglev, capaz de poner una carga útil de 4.725kg en una órbita de 327.000m en relación a la superficie de la Tierra, así como comparar su ventaja económica en relación a los sistemas actuales de cohetes espaciales. Para dilucidar las discusiones en este trabajo, inicialmente se elaborará una revisión bibliográfica sobre los nuevos estudios y aplicaciones en el área de sistemas Maglev con métodos Inductrack, a partir de la cual construiremos el modelo propuesto aquí, usando como base los modelos e investigaciones de trenes Maglev por medio de la técnica inductrack descrita en las patentes de posesión del Lawrence Livermore National Laboratory. se concluye que los los sistemas maglev serían más viables económicamente para la explotación del espacio, más seguros y no contaminantes al medio ambiente. Pero, todavía existen algunas limitaciones tecnológicas que no permiten su aplicación inmediata

Palabras clave: Maglev. Inductrak. Exploración del Espacio. Cohetes Espaciales.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Linhas de campo magnéticos para materiais com diferentes geometrias. A: num fio condutor percorrido por uma corrente, B: numa espira condutora, C: num ímã de barra, D: num selenoide, E: num toroide e F: num ímã de ferradura.	16
Figura 2	– Regra da mão direita para determinar a direção da força magnética que age numa partícula carregada, movendo-se com velocidade $\vec{v}$ em um campo magnético. . . .	17
Figura 3	– Diagrama simplificado do motor de um foguete espacial.	24
Figura 4	– Parâmetros do lançamento de um foguete.	26
Figura 5	– Esquema simplificado de um foguete de três estágios em serie.	27
Figura 6	– Esboço fora de escala de um modelo de lançadeira espacial. A: Início da pista de levitação e propulsão, B: Final da pista e rampa de decolagem, C: liberação da carga útil na órbita estabelecida. D: ponto de chegada da LEM (Pista de pouso). . .	31
Figura 7	– Esboço fora de escala de uma LEM, vista de um corte transversal.	33
Figura 8	– Campo magnético variando de acordo com a posição da matriz Halbach.	34
Figura 9	– Esquema simplificado de um trilho Inductrack de circuitos verticais "window frame track".	35
Figura 10	– Diagrama esquemático do conceito de um circuito do sistema Inductrack	36
Figura 11	– Simulação do campo magnético produzido por uma Matriz Halbach.	37
Figura 12	– Modelo da pista de um sistema Maglev usando o método Inductrack.	38
Figura 13	– Proporção entre a força de levitação e arrasto em função da velocidade.	43
Figura 14	– Forma senoidal dos campos magnéticos gerados pelo sistema Maglev.	44
Figura 15	– Esquema simplificado de um motor linear.	45
Figura 16	– Princípio de propulsão de um sistema Maglev.	46
Figura 17	– Comportamento das forças de levitação F_L e de arrasto F_D em função da velocidade.	49
Figura 18	– Comportamento da massa inicial e massa dos propulsores de um foguete, assim também como a massa de uma matriz Halbach, plotados em função da variação da massa útil.	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	BREVE APRESENTAÇÃO DO ELETROMAGNETISMO	14
2.1	Enfoque sinótico da Historia do electromagnetismo	14
2.2	Uma rápida abordagem sobre o campo magnético	16
2.3	Indução Eletromagnética	17
3	A TECNOLOGIA MAGLEV	19
4	DESCRIÇÃO SUCINTA SOBRE FOGUETES ESPACIAIS	23
4.1	Equações do movimento de um foguete espacial	23
4.1.1	Parâmetros do modelo de foguete	27
4.2	Para chegar à órbita	30
5	LANÇADEIRA ESPACIAL MAGLEV - LEM	31
5.1	Levitação magnética e estabilidade	31
5.1.1	Teorema de Earnshaw	32
5.2	Inductrack	32
5.2.1	Matriz de Halbach	36
5.2.2	Pista Inductrack	37
5.3	Modelagem matemática das forças de levitação e arrasto	37
5.4	Parâmetros físicos da LEM e pista de lançamento	41
5.4.1	Calculo de alguns parâmetros do sistema para a velocidade de transição da LEM	42
5.5	propulsão e guia lateral	43
5.5.1	Dinâmica da LEM na pista de lançamento	45
5.5.2	Movimento balístico	46
6	ANÁLISE DOS DADOS	48
7	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO A – MODELAGEM MATEMÁTICA E FÍSICA DE UM FOGUETE DE TRÊS ESTÁGIOS	54

A.1	Razão das massas de um foguete com propulsores químicos	54
-----	---	----

1 INTRODUÇÃO

Em 04 de outubro de 1957, a humanidade presenciou um o lançamento do Sputnik I, o primeiro objeto feito pelos humanos a orbitar nosso planeta (CHERTOK, 2009). Este pequeno aparelho foi desenvolvido pela extinta União Soviética sob a direção de Sergei Korolev, o mesmo era formado de um envoltório esférico feito de alumínio com 0,58 m de diâmetro e 84 kg de massa, no seu interior transportava alguns instrumentos rudimentares e um transmissor de rádio.

Este fato histórico deu início oficialmente à exploração do espaço por parte dos humanos, numa época em que a União Soviética e os Estados Unidos disputavam a dominação do mundo na chamada guerra fria, com este evento rapidamente a disputa se voltou-se para a exploração do espaço dando início assim à chamada corrida espacial, que teve seu auge na década de 1960 a 1970.

Nas décadas seguintes outros países como o Japão, China, França, Índia, e depois a União Europeia também iniciaram explorações nesta área. Segundo Filho (2002), seguindo essa tendência o Brasil, também iniciou diversos projetos nesta área, mas até o presente momento não foram bem sucedidos, pelo menos quanto ao desenvolvimento de lançadeiras espaciais próprias.

Apos algumas décadas do auge da corrida espacial o entusiasmo e grandes investimentos dos governos na época da guerra fria aos poucos foram-se esgotando e por outro lado rapidamente apareceram financiamentos privados, assim os esforços se voltaram mais para o desenvolvimento tecnológico de cargas úteis com fins comerciais (Satélites de comunicação, posicionamento global, etc) e não nos veículos que colocam elas no espaço.

Com o passar dos anos esse fato trouxe à tona um problema grave, a exploração do espaço para fins científicos se tornou extremamente caro e burocrático, ficando inviável para um grupo independente ou apenas uma nação realizar esta tarefa ou mesmo para consórcios envolvendo as nações mais ricas da Terra. Como por exemplo, para a construção da Estação espacial Internacional foi necessário a criação de um consórcio de 15 nações e um investimento de 150 bilhões de dólares e mesmo assim demorou mais de 10 anos para sua construção (HARLAND, 2002).

O encarecimento na exploração espacial não é a tecnologia necessária para manter a vida no espaço ou os sistemas de navegação e comunicação ou qualquer carga útil, mas sim colocá-las no espaço, por conta da quantidade de combustível necessário para um foguete conseguir colocar uma carga útil em órbita.

A tecnologia de propulsão usada nos foguetes espaciais é basicamente a mesma usada pelo foguete que colocou o Sputnik I em órbita 61 anos atrás, a qual utiliza como base as leis da mecânica clássica deduzidas a mais de 300 anos. Este fator tem sido uma preocupação presente a um bom tempo nos envolvidos, como Al Gore mencionou num celebre discurso no Goddard

Space Flight Center em Maryland, "Um dos problemas mais críticos do programa espacial dos EUA é a necessidade de reduzir o custo do lançamento das cargas úteis, seja elas satélites militares, científicos ou comerciais"(1992,Apud LONDON, J. 1994).

Desde então diversos empreendimentos tem surgido com a finalidade de baixar o custo dos foguetes, nestes últimos anos alguns desses avanços tem sido dados por empreendimentos privados como é o caso da SpaceX, que em 2017 conseguiu fazer pousar um foguete verticalmente numa plataforma apos colocar sua carga útil no espaço. Com esta técnica de reutilização espera-se diminuir em uma pequena porcentagem a colocação de cargas úteis no espaço, entre tanto mesmo com esta técnica o combustível utilizado e os princípios de propulsão continuam a ser os mesmos (SPACEX, 2018).

Partindo desta explanação levantou-se a hipótese de que a solução para este problema pode ser dada juntando-se a mecânica com o electromagnetismo e com base neste pensamento, este trabalho tem por objetivo esboçar um modelo matemático de uma lançadeira espacial usando sistemas MagLev (em condições ideais) capaz de colocar uma carga útil numa orbita de 327km em relação à superfície da Terra, assim também como realizar um estudo comparativo dos custos econômicos e impacto ambiental entre os foguetes espaciais e o modelo proposto.

Para conseguir os objetivos propostos empregou-se duas técnicas de pesquisa (GIL, A. 2010). Primeiramente se fez uma pesquisa bibliográfica- na qual usamos livros de referencia na área de electromagnetismo e os principais artigos publicados sobre Maglevs na IEEE Transactions on Applied Superconductivity, IEEE Xplore, Physical Review Letters, Nature, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Science, entre outros, bem como as patentes sobre tecnologia Inductrack pertencentes ao Lawrence Livermore National Laboratory. Com este embasamento prosseguiu-se para a segunda técnica de pesquisa, na qual se fez o estudo da dinâmica para colocar um objeto em orbita usando um hipotético foguete químico e uma veiculo usando sistemas Maglev.

Esta pesquisa justifica-se pelo fato de estarmos vivenciando uma época no qual nossa civilização passa por grandes problemas econômicos e sociais os quais precisam de um investimento de recursos humanos e econômicos mais urgente que os destinados para a exploração do espaço, e também pelo fato de o Brasil possuir um estagnado sistema espacial(desenvolvimento de lançadeiras espaciais) e um deteriorado sistema de ensino de ciências e matemática no nível básico (PISA, 2006, 2009, 2012, 2015), panorama pelo qual urge a necessidade do pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias que sejam eficientes e economicamente viáveis. Ademais de servir para professores usarem durante suas aulas como exemplo de contextualização da aplicação prática do electromagnetismo.

2 BREVE APRESENTAÇÃO DO ELETROMAGNETISMO

Electromagnetismo Segundo o dicionário da universidade de Oxford (2018), Eletromagnetismo é o ramo da física que estuda o fenômeno da interação de correntes ou campos elétricos e magnéticos, em consonância com o dicionário da universidade de Cambridge (2018), que refere-se à ciência do magnetismo e das correntes elétricas.

2.1 ENFOQUE SINÓTICO DA HISTORIA DO ELECTROMAGNETISMO

Para Jewett e Serway (2012), o fenômeno do magnetismo já era conhecido pelas civilizações antigas. Pois evidências encontradas em documentos chineses sugerem que esta civilização já havia observado o magnetismo em 2000 a.C. Os gregos registraram observações dos fenômenos elétricos e magnéticos por volta de 700 a.C.

De acordo com registros históricos, Tales de Mileto tinha percebido os efeitos de atração e repulsão da magnetita (Fe_3O_4) minério que de modo natural é atraída pelo ferro. Um pouco mais na frente os chineses teriam começado a fazer algumas aplicações rudimentares deste fenômeno, pois já utilizavam a bússola desde o século III a.C., e sabiam magnetizar o aço através de ímãs naturais, entretanto os gregos como chineses não tinham uma teoria que explicasse tal fenômeno.

Segundo Graça (2012), na Grécia Antiga também era conhecido o fato de que ao se atritar um pedaço de uma resina fóssil translúcida e amarela derivada de um pinheiro da época, conhecida como âmbar, com o pelo de algum animal esse material adquiria a propriedade de atrair pequenas partículas de pó ou pequenos pedaços de plumas. Porém também não se tinha uma explicação teórica plausível para explicar estes fatos.

Finalmente no século XII, Petrus Peregrinus produziu uma obra intitulada *Epístola de Magnete*, na qual relatava experiências com o magnetismo. Nesta obra ele buscava de forma rudimentar explicar os fenômenos elétricos e magnéticos. Contudo este trabalho foi ignorado até fins do século XVI, época em que William Gilbert (1544-1603) iniciou um estudo sistemático da eletricidade e conseguiu provar que não é apenas o âmbar que adquire essa estranha propriedade, mas também isto pode acontecer ao esfregar seda num pedaço de vidro. Na tentativa de explicar estes fenômenos, ele postulou a hipótese da existência de um fluido nos materiais, o qual era retirado ao ser atritado com a pele de um animal, restando uma emanção, a qual causava a força que atraía as partículas de pó (PUMFREY; TILLEY, 2003).

Em 1747, Benjamin Franklin na América e William Watson na Inglaterra isoladamente chegaram a mesma conclusão: todos os materiais possuem um tipo único de "fluido elétrico" que pode penetrar no material livremente, mas que não pode ser criado e nem destruído. A ação da fricção simplesmente transfere o fluido de um corpo para o outro, eletrificando ambos. Franklin

e Watson introduziram o princípio da conservação de carga, *a quantidade total de eletricidade em um sistema isolado é constante*.

Em 1785, Charles Augustin de Coulomb (1735-1806) utilizando uma balança de torção conseguiu quantificar a força elétrica e descobriu a espantosa lei que hoje recebe seu nome, *a lei de Coulomb*, a qual afirma que a força elétrica entre duas cargas puntiformes tem intensidade proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Esta teoria marcou um grande passo que levou o estudo da eletricidade do qualitativo para o quantitativo.

Henry Cavendish (1731-1810) desenvolveu várias ideias quantitativas sobre os fenômenos elétricos. Por exemplo, Cavendish demonstrou que a capacidade de um condensador dependia da substância inserida entre as placas e estabeleceu o grau de eletrificação de um corpo em relação ao ângulo formado entre duas folhas de ouro que se repeliam quando submetidas ao contato com a eletricidade. Ao mesmo tempo em que trabalhou com a ideia de distribuição de cargas elétricas nas superfícies de condutores e de potencial elétrico. Em seu trabalho de 1771 ele estabeleceu a diferença entre carga elétrica armazenada em um corpo e tensão.

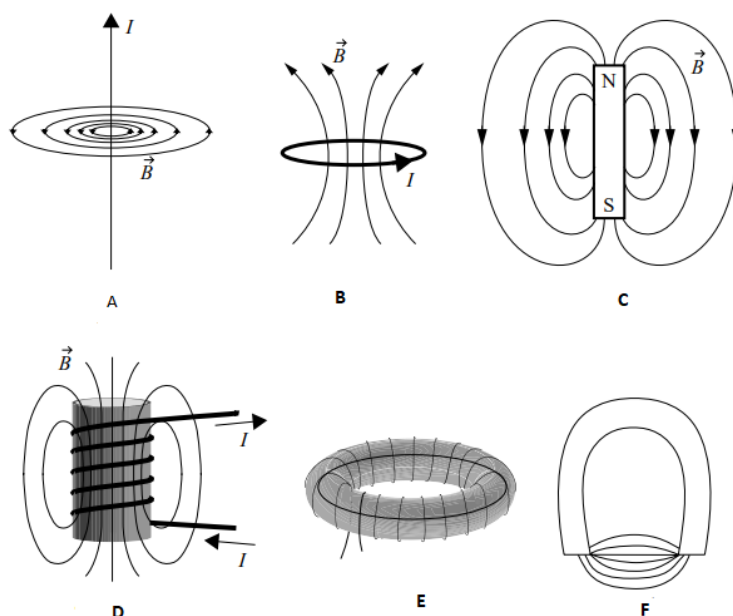
Passaram-se quase 30 anos do trabalho de Cavendish para que Joseph Bank (1743-1820) fizesse a leitura para a “Royal Society” de uma carta de Alessandro Volta na qual relatava ter conseguido produzir corrente elétrica contínua utilizando a sua célebre invenção, a pilha. Na verdade Volta havia construído a sua pilha em 1796 e foi o primeiro a conseguir retirar energia elétrica de uma outra fonte que não seja mecânica.

Em 1820, um novo fenômeno foi observado por acaso por Hans Christian Oersted (1777-1825), durante uma de suas aulas sobre o efeito térmico das correntes elétricas nos fios condutores, ele percebeu que a passagem de corrente por um fio condutor influencia uma agulha magnética nas proximidades. Surpreendentemente esta notícia se espalhou de forma muito rápida e muitas outras experiências foram realizadas. Neste sentido André Marie Ampère (1775-1836) descobriu o efeito das correntes entre dos fios condutores próximos e estabeleceu a primeira teoria matemática desse novo fenômeno.

Michael Faraday (1791-1867), enquanto estudava novas formas de gerar movimento, descobriu que ao se ter um campo magnético variável ao redor de um fio condutor era gerada uma no mesmo. Ou seja, Faraday descobriu uma maneira de gerar eletricidade através do movimento. Mas, ele não foi o único a fazer esta descoberta, quase concomitantemente Joseph Henry (1797-1878) descobriu a força eletro-motriz de auto-indução.

Finalmente todos os inúmeros experimentos e a colaboração de muitos cientistas ao longo dos séculos permitiram que o edifício teórico do eletromagnetismo (base de todos os desenvolvimentos tecnológicos de nossa época) fosse definitivamente estabelecido em 1873 pelas mãos de James Clerk Maxwell (1831-1879).

Figura 1 – Linhas de campo magnéticos para materiais com diferentes geometrias. A: num fio condutor percorrido por uma corrente, B: numa espira condutora, C: num ímã de barra, D: num selenoide, E: num toroide e F: num ímã de ferradura.



Fonte: Fleisch, 2016.

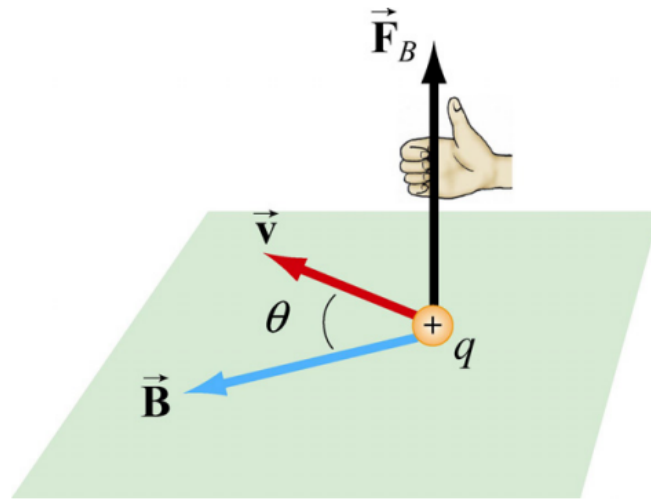
2.2 UMA RÁPIDA ABORDAGEM SOBRE O CAMPO MAGNÉTICO

Em física um campo representa a distribuição espaço-temporal de uma quantidade física; ou seja, é uma propriedade que pode ser medida no ambiente de cada ponto de uma região do espaço para cada instante de tempo. Matematicamente os campos são representados por uma função definida em uma determinada região e graficamente são representados por linhas ou superfícies da mesma magnitude. Nesse sentido podemos usar a definição para campo magnético dada por Nicolaide (2012):

O campo magnético é o sistema físico que existe nas regiões do espaço em que ações ponderomotivas (forças ou torques) de natureza magnética podem ser exercidas sobre corpos magnetizados ou em corpos que transportam correntes elétricas. O campo magnético existe em torno de corpos magnetizados, bem como em seu interior e representa em qualquer quadro de referência um componente do campo eletromagnético (NICOLAIDE, 2012, p.113).

Neste sentido de acordo com Timoreva (1977), da mesma forma que no espaço ao redor de uma carga elétrica se forma um campo elétrico de determinadas propriedades físicas, no espaço ao redor de condutores percorridos por corrente elétrica cria-se um campo especial, denominado campo magnético. Em consonância com Griffiths, D. J. (2011), que nos disse que, enquanto uma carga estacionária produz somente um campo elétrico $\vec{E}$ no espaço à sua volta, uma carga em movimento gera também um campo magnético $\vec{B}$ o qual é inclusive mais fácil de detectar, para isso basta aproximar uma bússola.

Figura 2 – Regra da mão direita para determinar a direção da força magnética que age numa partícula carregada, movendo-se com velocidade $\vec{v}$ em um campo magnético.



Fonte: SERWAY, R.; JEWETT, J. 2012.

Do mesmo modo que o campo elétrico o campo magnético pode ser representado usando "linhas de campo" a diferença é que no magnético estas linhas são fechadas. Na figura (1) são mostrados objetos com diferentes geometrias assim como as linhas de campo ao redor destes.

Para um estudo quantitativo podemos definir um campo magnético $\vec{B}$ de algum ponto do espaço em termos de uma força magnética $\vec{F}_B$ que o campo exerce numa partícula carregada movendo-se com uma velocidade $\vec{v}$. A qual podemos definir da seguinte maneira:

$$|\vec{F}_B| = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

A equação (2.1) pode ser entendida como a definição de trabalho do campo magnético em um ponto no espaço. A direção da Força magnética em relação a $\vec{B}$ e $\vec{v}$ está demonstrada na figura (2) e a magnitude do $\vec{F}_B$ é dado por:

$$|\vec{F}_B| = |q|vB\text{seno}(\theta) \quad (2.2)$$

Onde:

$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}_B|}{q|\vec{v}|\text{sen}(\theta)} \quad (2.3)$$

O entendimento do electromagnetismo e suas aplicações de uma forma geral, derivasse do estudo das equações de Maxwell, as quais estão listadas na tabela (1).

2.3 INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Experimentos feitos por Michael Faraday e por Joseph Henry nos Estados Unidos mostraram que uma *fem* (Força Eletromotriz) pode ser induzida num circuito por um campo magnético

Tabela 1 – Equações de Maxwell de forma integral e diferencial, respectivamente.

Forma integral	Forma diferencial
$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Fonte: Fleisch,2016.

variável. Os resultados desses experimentos levaram a uma lei bastante básica e importante do eletromagnetismo conhecida como *Lei da Indução de Faraday*. Neste aspecto a corrente induzida somente existe enquanto o campo magnético que atravessa a espira estiver variando, isto é, quando o fluxo do campo magnético atingir um valor estável a corrente desaparece. Em geral essa *fem* é diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo magnético que atravessa o circuito, matematicamente é dada por: /

$$E = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.4)$$

O sinal negativo da equação (2.4) se deve à oposição da força eletromotriz à variação do fluxo magnético. ou seja, o sentido da corrente é o oposto da variação do campo magnético que lhe deu origem. Havendo uma diminuição no fluxo magnético, a corrente criada gerará um campo no mesmo sentido do fluxo magnético da fonte e se houver um aumento, a corrente criada gerará um campo magnético oposto ao sentido do fluxo magnético da fonte. Este princípio é explicado pela *Lei de Lenz*.

A aplicação prática dessas leis e do eletromagnetismo como um todo deram origem a inúmeras tecnologias na área da saúde, comunicação, entretenimento, transporte, entre outras, as quais mudaram totalmente a forma de viver dos humanos. Mas, neste trabalho daremos ênfase a uma tecnologia que revolucionou o sistema de transportes usando trens de alta velocidade denominada *Maglev*.

3 A TECNOLOGIA MAGLEV

Maglev é um termo que surgiu na década de 1970 e é a abreviação de levitação magnética. De acordo com o dicionário da universidade de Cambridge (2018), Maglev é um sistema de transporte avançado no qual um trem viaja em uma pista magnética, em conformidade com o dicionário da universidade de Oxford (2017), o qual refere-se a um sistema de transporte em que os trens deslizam acima de uma pista suportados por repulsão magnética e impulsionados por um motor linear.

De acordo com Yaghoubi (2013), denomina-se Levitação Magnética ao fenômeno pelo qual um determinado material pode literalmente levitar graças à repulsão entre os polos iguais de dois ímãs ou nos supercondutores devido ao que é conhecido como "Efeito Meissner". Segundo Ostemann (2005), O efeito Meissner é a capacidade para rejeitar um campo magnético que tenta penetrar no seu interior; de modo que se colocarmos um ímã por cima de um supercondutor é gerada uma força magnética de repulsão que é capaz de contrariar o peso do ímã produzindo assim a levitação do mesmo.

Ao passo que para Liu, Long e Li (2015), Maglev é um método de propulsão que usa levitação magnética para locomover veículos com ímãs em vez de rodas, eixos e rolamentos. Entretanto, este autor também ressalta que o termo Maglev não apenas refere-se aos veículos, mas também à ferrovia, ou seja, ao sistema completo de levitação magnética e propulsão.

Para um melhor entendimento vale destacar que supercondutividade é uma característica de alguns compostos, que abaixo de uma certa temperatura não oferecem resistência à passagem da corrente elétrica; ou seja, são materiais que podem alcançar uma resistência nula (POOLE, 2014). Nestas condições de temperatura, não são apenas capazes de transportar corrente elétrica sem perdas, mas também possui a propriedade de rejeitar as linhas de um campo magnético aplicado.

O conceito de levitação magnética para ser usada em trens foi idealizado há mais de 100 anos atrás, de fato em março de 1912, o engenheiro e inventor Emile Bachelet teve concedida uma patente dos EUA para a sua "Levitated Transmitting Apparatus", e ele fez um anúncio público de uma demonstração de sua invenção em Nova York com a esperança de chamar a atenção de investidores sob a promessa de um transporte terrestre de alta velocidade (YAGHOUBI, 2013). Mas, pesquisadores usando modelos aerodinâmicos em túneis de vento descobriram que em alta velocidade a estrutura mecânica do aparelho em contato com o ar causava mais arrasto que de propulsão produzido pelo modelo magnético.

A solução para este impasse foi desenvolvida por Gene Covert e seus colegas do MIT na década de 1950 e foi usando a levitação magnética embora eles chamassem uma *suspensão magnética e sistema de equilíbrio*. Por outro lado, na Europa em 1922, o engenheiro alemão

Hermann Kemper propôs pela primeira vez o conceito de transporte Maglev e recebeu as patentes desta tecnologia em 1934.

Devido as limitações tecnológicas da época, passou-se 30 anos sem que o transporte Maglev tivesse um desenvolvimento significativo, somente no ano de 1969, a empresa alemã Krauss-Maffei desenvolveu o primeiro modelo de laboratório de trem Maglev (chamado TR01) do mundo, cujo peso, comprimento e suspensão são respectivamente, 80 kg, 1 m e 4 mm de suspensão (LIU; LONG; LI, 2015).

Usando um ímã móvel foi possível contornar a regra de Earnshaw, a qual afirma que um conjunto de cargas pontuais não podem se manter em um estado de equilíbrio mecânico estacionário exclusivamente pela interação eletrostática das cargas (EARNSHAW, 1848). Assim, a levitação por meios magnéticos pode ser alcançada, se as condições para o teorema forem violadas, assim movendo-se um ímã na presença de um condutor elétrico pode-se induzir correntes de Foucault no condutor e gerar forças repulsivas associadas as forças do ímã. Esta é a base do processo eletrodinâmico da abordagem dos trens MagLev propostos pelos cientistas americanos James Powell e Gordon Danby na década de 1960.

Desde então, pesquisas extensas e grandes avanços na área de Maglevs foram realizadas em vários países do mundo. Com tudo a descoberta mais promissora nesta área foi patenteada em 1999 por uma equipe de cientistas americanos e recebe o nome de *Inudctrack*, de acordo com Post (2000) este novo sistema usa ímãs permanentes no veículo e bobinas indutivas na pista e o mais importante é que ambos funcionam a temperatura ambiente.

No entanto, apesar dos grandes avanços e popularização desta tecnologia, somente Japão e Alemanha possuem a maior experiência em desenvolvimento nesta área, com a Japan National Railway e a Siemens respectivamente. Ambos países têm pistas de provas e realizaram testes extensivos de veículos em tamanho real, sistemas de propulsão e guias. Porém a China foi o primeiro país a ter um sistema Maglev para transporte público, seguido de Japão, Alemanha e em menor escala pela Coreia do Sul.

Yaghoubi (2013) explica que os sistemas Maglev utilizam a física fundamental das correntes elétricas que experimentam forças à distância.

Os sistemas Maglev são mais frequentemente descritos em termos de interação da corrente elétrica com campos magnéticos. No caso da utilização em sistemas de transporte, como as massas dos veículos são grandes, precisa-se também de forças robustas para a suspensão magnética. Essas forças são fornecidas pelos campos magnéticos de grandes correntes supercondutoras ou pequenas aberturas de ar em circuitos ferromagnéticos normais (YAGHOUBI, 2013,p.4).

Ao contrário dos veículos ferroviários tradicionais, nos sistemas Maglev não existe contato com os trilhos da linha férrea, nem um motor convencional para orientação e propulsão, também não existem rodas ou eixos de transmissão, este fator aumenta o tempo de vida útil dos componentes, diminuindo drasticamente seus custos de manutenção em relação aos trens

convencionais.

Nos sistemas Maglev os veículos se movem ao longo de campos magnéticos que são estabelecidos entre o veículo e os trilhos da linha férrea. Estas condições de locomoção sem contato mecânico com os trilhos e a ausência de atrito possibilitam alcançar maiores velocidades que os atuais "trens bala" ou trens convencionais de alta velocidade.

Segundo Liu, Long e Li (2015), nos dias atuais existem dois tipos principais de trens Maglev em operação, os que usam suspensão eletromagnética (EMS), no qual os eletroímãs localizados no trem são controlados por um computador e atraem o trem magneticamente para os trilhos que geralmente são condutores de aço, os outros são os que usam suspensão eletrodinâmica (EDS), no qual se usa eletroímãs supercondutores ou imãs permanentes que criam um campo magnético que induz correntes em condutores metálicos próximos, quando há movimento relativo estes empurram o trem para a posição de levitação projetada na linha férrea.

Existe um outro modelo experimental chamado Inductrack, que usa o campo magnético de uma matriz de ímã permanente e uma pista composta por bobinas indutivas, neste tipo de Maglev a levitação é conseguida apenas após superada uma certa velocidade, e uma de suas maiores vantagens é a estabilidade. Este método foi projetado, provado matematicamente, revisado por pares e patenteado, mas ainda não foi construído em escala real e até o presente só existem protótipos para testes. (POST, 2000).

Para Powell, Maisie e Charles (2013), os transportes usando sistema MagLev é a única forma inovadora de transporte inventada depois do avião, com capacidade para revolucionar a forma de locomoção de nossa sociedade e estes autores ainda sugerem que o sistema Maglev poderia ser usado para a exploração espacial.

Já foi demonstrado com sucesso a eficiência e segurança dos sistemas Maglev, os quais aos poucos estão começando a ser implementados e é inevitável que no futuro esta tecnologia seja direcionada para o lançamento de cargas úteis ao espaço, a qual certamente irá trazer novos avanços importantes e uma maior capacidade de colocar cargas úteis no espaço a custos econômicos muito mais baixos que os atuais (POWELL, MAISE E CHARLES, 2013, p.30).

Reafirmando a visão dos autores, nos Estados Unidos o Marshall Space Flight Center em Huntsville, possui há alguns anos uma pista experimental para testes com velocidades supersônicas e está em desenvolvimento um projeto de levitação magnética chamado Marshall's Advanced Space Transportation. De acordo com Yaghoubi (2013), Neste local está sendo desenvolvida uma tecnologia Maglev que acelera um transportador a um equivalente de 10 vezes a aceleração da gravidade.

Segundo Yaghoubi (2013), existem alguns projetos que estudam a possibilidade de utilizar sistemas Maglev apenas para substituir o primeiro estágio de uma lançadeira espacial, no qual uma nave espacial seria acelerada a velocidades de 965 km/h sem usar qualquer combustível a bordo, no final da pista a nave poderia decolar como um avião e depois mudar para motores

de foguete e continuar assim até sua respectiva órbita. Segundo os estudos esta técnica poderia reduzir em cerca de 20 % a massa do foguete, o que resultaria numa considerável economia.

Existem estudos nos quais se demonstrou a viabilidade da construção de lançadeiras espaciais usando sistemas Maglev, que poderiam chegar a uma velocidade de 1.000 km/h em 10 segundos, resultados como estes levam a Powell, Maise e Charles (2013), a pensar num futuro promissor:

O Maglev é uma nova tecnologia radical para lançadeiras espaciais. Assim, em vez de usar foguetes para colocar objetos no espaço a um custo elevado, as lançadeiras Maglev acelerariam as cargas úteis com velocidades orbitais em túneis de vácuo na Terra. As cargas úteis entrariam na atmosfera da Terra e se elevariam até o espaço para orbitar nosso planeta ou para começar suas viagens à Lua e ao resto do Sistema Solar (POWELL, MAISE E CHARLES, 2013, p.34).

4 DESCRIÇÃO SUCINTA SOBRE FOGUETES ESPACIAIS

Um foguete espacial é o nome dado popularmente a uma lançadeira espacial, a qual é uma máquina que se desloca expelindo atrás de si um fluxo de gás a alta velocidade. Por conservação da quantidade de movimento o foguete desloca-se no sentido contrário com velocidade tal que, multiplicada pela massa do foguete o valor da quantidade de movimento é igual ao dos gases expelidos (SUTTON, 1963).

4.1 EQUAÇÕES DO MOVIMENTO DE UM FOGUETE ESPACIAL

A descrição do movimento de um foguete começa com a segunda lei do movimento apresentada por Newton na sua obra *Princípios matemáticos da filosofia natural*, a qual disse que "A aceleração de um corpo em movimento é diretamente proporcional à força aplicada sobre ele", ou seja:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (4.1)$$

A força atuante sobre um corpo é igual ao produto de sua massa pela variação de velocidade que experimenta num certo intervalo de tempo.

$$\vec{F} = \frac{m \cdot \vec{v}}{t} \quad (4.2)$$

A expressão no numerador da equação (4.2) recebe o nome de momento linear ou quantidade de movimento, assim:

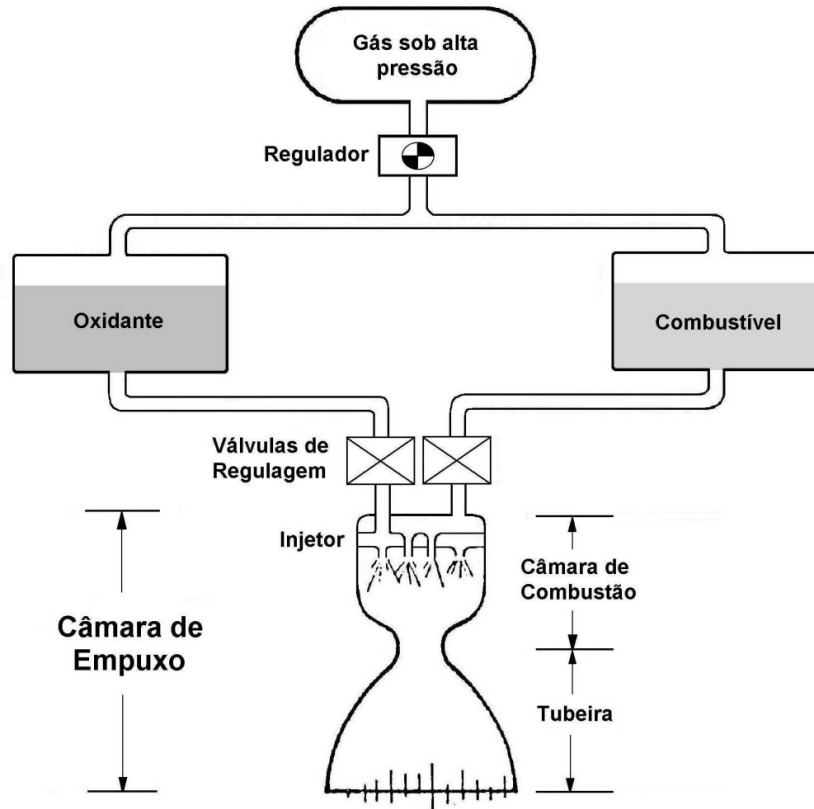
$$\vec{F} = \frac{\vec{q}}{t} \quad (4.3)$$

Onde $\vec{q} = m \cdot \vec{v}$ é o momento linear. Sabe-se que motores dos foguetes convencionais funcionam queimando uma mistura de compostos ou reagentes químicos, os quais são divididos em combustíveis e oxidantes, designados genericamente como propelentes. Quando estes dois compostos reagem dentro de uma câmara de combustão o oxidante retira elétrons do combustível, gerando energia no processo e produzindo um gás sob alta pressão. Este gás sofre expansão e pressiona de forma desigual as paredes da câmara, provocando uma força de reação sobre o foguete, a qual recebe nome de empuxo e é dado por:

$$\vec{T} = \frac{\vec{q}}{t_p} \quad (4.4)$$

onde $\vec{q} = m \cdot \vec{v}_e$, sendo $\vec{q}$ o momento linear do gás e t_p o tempo de queima dos propelentes. O gás produzido pela combustão do propelente é então direcionado para fora da câmara atravessando um dispositivo cônico chamado tubeira ou local onde é acelerado, um diagrama simplificado deste dispositivo é mostrado na figura (3). Ao passar pela tubeira o gás assume a forma de um jato em alta velocidade, mas com pressão e temperatura menores, já que a energia térmica é convertida em energia cinética, o quociente entre a massa dos propelentes e tempo de combustão

Figura 3 – Diagrama simplificado do motor de um foguete espacial.



Fonte: SUTTON, G. 1963

deles é definido como a razão de variação da massa $\dot{m}$ do foguete, onde $\dot{m}$ é dada em kg/s .

$$\dot{m} = \frac{m_p}{t_p} \quad (4.5)$$

Combinando-se as equações (4.4) e (4.5), se obtêm a seguinte relação para o empuxo.

$$\vec{T} = \dot{m} \cdot v_e \quad (4.6)$$

Onde v_e é velocidade de exaustão dos gases e é dado em $\frac{m}{s}$. O valor de q do gás não é o único fator que influencia na no valor final do T , a diferença de pressão entre o jato e atmosfera agindo sobre a superfície de saída da tubeira também influencia no valor final de T .

$$\vec{T} = \dot{m} \cdot v_e + (p_g - p_{at}) \cdot A_0 \quad (4.7)$$

Onde p_0 é a pressão do gás sobre a superfície de saída da tubeira e p_{at} pressão atmosférica local. o termo $(p_g - p_{at}) \cdot A_0$, sendo A_0 a área de seção transversal da saída da tubeira. Para o estudo de nosso hipotético foguete usaremos $p_0 = p_{at}$ que é o caso ideal, pois empuxo torna-se independente das condições do ambiente.

A quantidade de propelentes transportado e a massa da estrutura também é um fator importante a ser considerado no estudo do movimento de um foguete, pois durante o lançamento

e em parte da trajetória o veículo esta posicionado verticalmente, neste caso a ação do peso será a de anular parte do empuxo, o peso é designado como:

$$W = m_0 \cdot g \quad (4.8)$$

Onde m_0 é a massa total do foguete e g o aceleração da gravidade ao nível do mar. Deste modo, Pode-se estimar o efeito do peso β do foguete sobre o empuxo produzido pelo motor no momento do lançamento .

$$\beta = \frac{\vec{T}}{W} \quad (4.9)$$

Para o objetivo de colocar uma carga no espaço deve-se escolher $\beta > 1$, pois apenas neste caso o motor do foguete consegue gerar um empuxo capaz de vencer a força peso associada à massa do foguete. Também é preciso um estudo da força gerada por uma unidade de combustível denominada impulso total I_t , a qual é igual a quantidade de movimento de um corpo e é para este caso pode-se definir em função do empuxo.

$$I_t = \vec{T} \cdot t_p \quad (4.10)$$

Com tudo, uma das medidas mais comuns da eficiência do foguete é o seu impulso específico I_{sp} , que é definido como o impulso total pela taxa do fluxo do consumo da massa do propulsor:

$$I_{sp} = \frac{\vec{T}}{\dot{m} \cdot g} = \frac{v_e}{g} \quad (4.11)$$

A partir dos conceitos e equações supracitadas, pode-se calcular a velocidade de propulsão de um foguete em condições ideais a partir da seguinte equação:

$$V_p = v_e \ln \frac{m_0}{m_f} \quad (4.12)$$

Onde m_0 é a massa total do foguete ou massa inicial e é definida da seguinte maneira

$$m_0 = m_u + m_p + m_e \quad (4.13)$$

Onde m_u é a massa da carga útil, m_E a massa da estrutura do foguete e m_p é a massa do propulsor. Do mesmo modo a massa final m_f pode ser expressada assim:

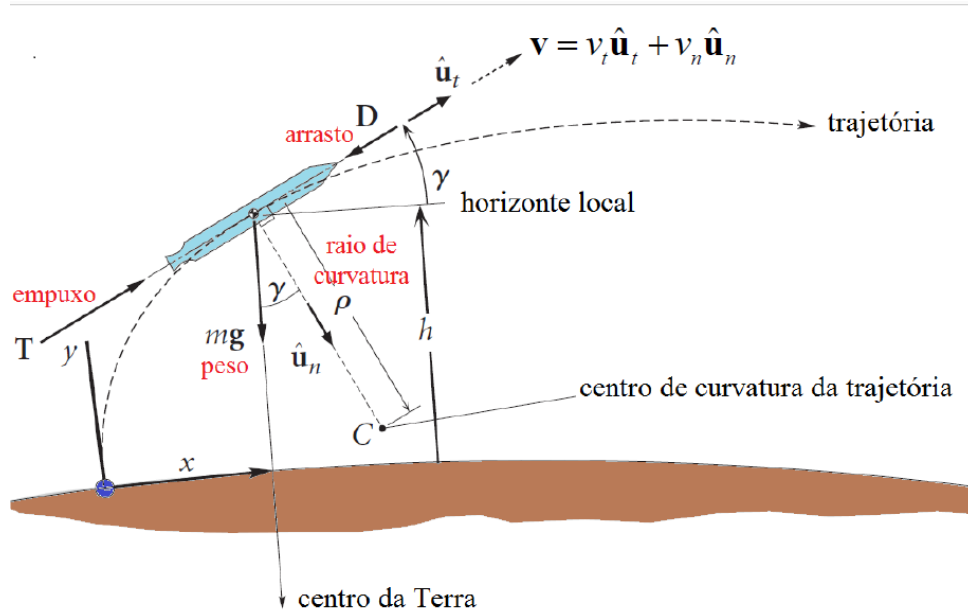
$$m_f = m_u + m_e \quad (4.14)$$

A razão das massas $\frac{m_0}{m_f}$, também conhecido como número de Tsiolkovsky (ou relação das massas) e pode ser denotado assim:

$$N_T = \frac{m_p + m_e + m_u}{m_e + m_u} \quad (4.15)$$

Também deve ser considerado algumas perdas na velocidade do foguete devido ao arrasto atmosférico D , o qual é proporcional ao quadrado da velocidade e à área de contorno da seção

Figura 4 – Parâmetros do lançamento de um foguete.



Fonte: Curtis, 2005.

transversal perpendicular ao movimento, ou seja depende basicamente da aerodinâmica da fuselagem e detalhes construtivos, matematicamente temos:

$$D = \frac{\rho_{at} \cdot \Delta V^2 \cdot A_0}{2} \cdot C_D \quad (4.16)$$

Onde C_D é o coeficiente de arrasto e geralmente esse valor é obtido em laboratório com o uso de modelos em escala e tuneis de vento. Também deve-se levar em consideração o fator da perda de empuxo devido ao peso do foguete, o qual é denominado de sustentação L , onde C_L é o coeficiente por sustentação e obtido de forma similar a C_D , matematicamente temos:

$$L = \frac{\rho_{at} \cdot \Delta V^2 \cdot A_0}{2} \cdot C_L \quad (4.17)$$

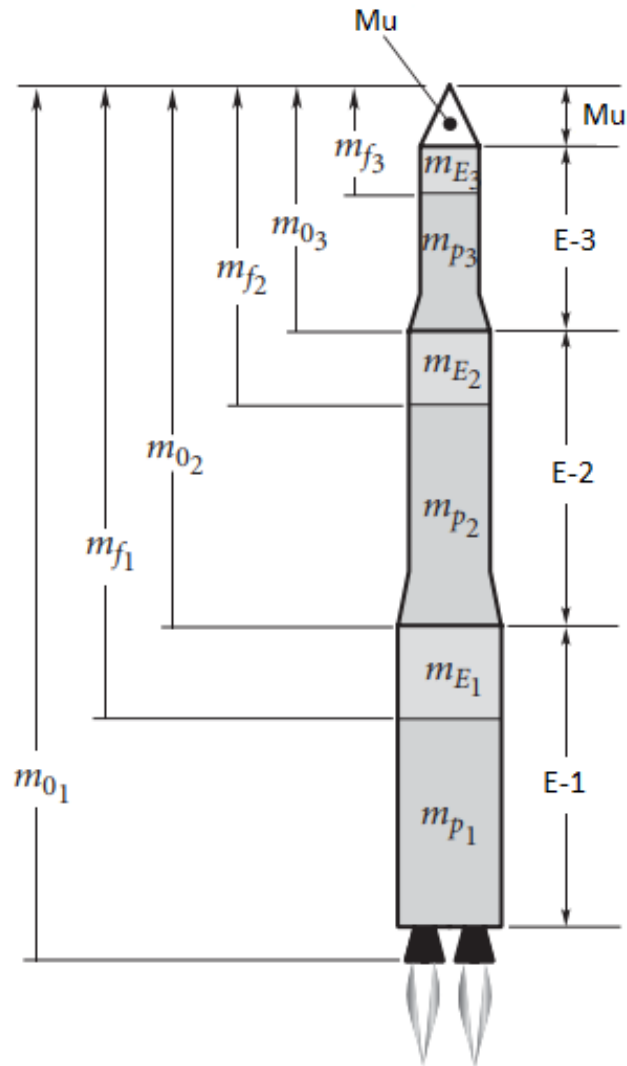
Combinando-se as equações (4.11), (4.13), (4.14), (4.16), (4.17), pode-se obter a expressão da velocidade de propulsão V_p que um motor de foguete pode proporcionar queimando uma massa de combustível Δm , ou seja:

$$V_p = I_{sp} g_0 \ln \frac{m_0}{m_f} - (D + L) \quad (4.18)$$

Da a equação (4.9) sabe-se que o peso do foguete tende a anular parte do empuxo e quanto menor for a inclinação do foguete em relação à superfície da Terra, menor será a ação do peso. Supondo que o foguete mantenha fixo o angulo de lançamento durante a combustão de seus propelentes, este fator pode ser dado por:

$$\delta V_g = g \cdot t_p \cdot \cos \gamma \quad (4.19)$$

Figura 5 – Esquema simplificado de um foguete de três estágios em serie.



Fonte: Curtis ,2005.

A velocidade final adquirida por um foguete ou a velocidade orbital com que uma carga útil chega à órbita preestabelecida é dada por:

$$v_o = V_p - \delta V_g \quad (4.20)$$

A seguir serão aplicadas as equações enunciadas anteriormente, com a finalidade de entender as dimensões físicas de um hipotético foguete capaz de colocar uma carga útil no espaço.

4.1.1 Parâmetros do modelo de foguete

Nesta parte do trabalho será discutido os parâmetros de construção de um hipotético foguete, cuja missão será a de colocar em órbita uma massa similar à da capsula espacial que levou Iuri Gagarin ao espaço. Com base na literatura foram escolhidos os itens descritos na tabela (2), a partir dos quais se deduzira o modelo de foguete.

Tabela 2 – Os valores de m_u , I_{sp} , R_o e t_p foram escolhidos com base nos parâmetros do foguete Vostok 8K72K, enquanto que π_u , ε são os valores limites permitidos pela tecnologia atual.

m_u	π_u	ε	I_{sp}	g_0	R_o	t_p
4.725 kg	0,05	0,15	315s	9,81m/s ²	327.000m	280 s

Fonte: CURTIS, 2005.

Para a missão de colocar uma objeto no espaço ser bem sucedida, não basta deixar a carga na orbita estabelecida é preciso também que ela seja deixada com velocidade suficiente para orbitar ao redor da Terra. Assim quando pensa-se na construção de um foguete o primeiro passo é calcular a velocidade de propulsão que depende dos objetivos de cada missão.

O valor de v_p para um foguete de um único estágio capaz de transportar a carga útil descrita na tabela (2), segundo Curtis (2005), pode ser calculada da seguinte forma:

$$v_p = 315s \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \ln \left(\frac{1}{0,05(1 + 0,15) + 0,15} \right) = 4.859,64 \frac{m}{s} \quad (4.21)$$

Pode-se observar a partir do resultado obtido na equação (4.21) que um foguete de um único estágio seria incapaz de colocar a carga útil no espaço com velocidade para orbitar a Terra. Usando a equação (A.8), pode-se obter o valor da a massa inicial do foguete em questão: parâmetros estabelecidos.

$$m_0 = \frac{m_u}{\pi_u} = \frac{4.725kg}{0,05} = 94.500kg \quad (4.22)$$

O valor da massa da estrutura do foguete pode ser dada pela seguinte equação:

$$m_e = \varepsilon(m_0 - m_u) = 0,15(94.500 - 4.725) = 13.466,25kg \quad (4.23)$$

Com os dados das equações (4.22) e (4.23), pode-se obter o valor da massa dos propelentes do foguete, ou seja:

$$m_p = m_0 - m_e - m_u = 94.500kg - 13.466,25 - 4.725kg = 76.308,75kg \quad (4.24)$$

Contudo, percebe-se que um foguete de um único estagio mesmo consumindo 76.308,75kg de propelentes não é capaz de conseguir uma velocidade orbital . Assim, deve-se optar pela construção de um foguete com mais estágios sem acrescentar a massa inicial estabelecida na na tabela (2). Usando a equação (A.22), pode-se obter a velocidade de propulsão gerada pelo segundo estágio de um foguete, ou seja:

$$v_{p2} = 315s \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \ln \left[\frac{1}{\sqrt{0,05}(1 - 0,15) + 0,15} \right]^2 = 6.674,72 \frac{m}{s} \quad (4.25)$$

Usando a equação (A.24), pode-se calcular a massa da estrutura de cada um dos dois estágios deste foguete:

$$m_{e1} = \frac{(1 - \sqrt{0,05})0,15}{0,05} 4.725kg = 11.009,25kg \quad (4.26)$$

Usando a equação (A.35) pode-se determinar a massa da estrutura do segundo estágio

$$m_{e2} = \frac{(1 - \sqrt{0,05})0,15}{0,223} 4.725kg = 2.437,71kg \quad (4.27)$$

Com a equação (A.40) é dado valor da massa do propulsor do primeiro estágio

$$m_{p1} = \frac{(1 - \sqrt{0,05})(1 - 0,15)}{0,05} 4.725kg = 62.412,52kg \quad (4.28)$$

De modo semelhante, para calcular a massa do propulsor do segundo estágio usamos a equação (A.41), ou seja:

$$m_{p2} = \frac{(1 - \sqrt{0,05})(1 - 0,15)}{\sqrt{0,05}} 4.725kg = 13.984,30kg \quad (4.29)$$

Novamente pode-se observar a partir do resultado da equação (4.25), que a v_P final obtida por um foguete de dois estágios ainda é insuficiente para a carga útil obter uma velocidade orbital suficiente para não cair na Terra. Consequentemente deve-se formular um modelo de foguete com três estágios e para calcular a v_P produzida por um terceiro estágio usamos a equação (A.32), assim:

$$v_{p3} = 315s.9,81 \frac{m}{s^2} \ln \left(\frac{1}{0,05^{\frac{1}{3}}(1 - 0,15) + 0,15} \right) = 10.448,83 \frac{m}{s} \quad (4.30)$$

A partir da equação (4.30), pode-se observar que foi atingido um valor suficiente para a carga útil orbitar a Terra. Agora fazendo uso da equação (A.34), pode-se obter o valor da massa da estrutura do primeiro dos três estágios do modelo de foguete.

$$m_{e1} = \frac{1 - 0,05^{\frac{1}{3}}}{0,05} 4.725kg = 9.043,65kg \quad (4.31)$$

Com a equação (A.35), encontra-se o valor da massa da estrutura do segundo estágio.

$$m_{e2} = \frac{1 - 0,05^{\frac{1}{3}}}{0,05^{\frac{2}{3}}} 4.725kg = 3.349,50kg \quad (4.32)$$

E com a equação (A.36), pode-se obter a massa da estrutura do terceiro estágio, ou seja:

$$m_{e3} = \frac{1 - 0,05^{\frac{1}{3}}}{0,05^{\frac{1}{3}}} 4.725kg = 1.228.75kg \quad (4.33)$$

Usando a equação (A.40) calcula-se a massa do propulsor do primeiro estágio, deste modo:

$$m_{p1} = \frac{(1 - 0,05^{\frac{1}{3}})(1 - 0,15)}{0,05} 4.725.kg = 50.765,40kg \quad (4.34)$$

A massa do propulsor do segundo estágio, pode ser obtido usando a equação(A.41)

$$m_{p2} = \frac{(1 - 0,05^{\frac{1}{3}})(1 - 0,15)}{0,05^{\frac{2}{3}}} 4.725.kg = 18.802kg \quad (4.35)$$

Usa-se a equação (A.42) para calcular a massa do propulsor do terceiro estágio, assim:

$$m_{p3} = \frac{(1 - 0,05^{\frac{1}{3}})(1 - 0,15)}{0,05^{\frac{1}{3}}} 4.725.kg = 6.897,47kg \quad (4.36)$$

4.2 PARA CHEGAR À ORBITA

Para obter o valor da velocidade relativa entre o foguete e a superfície da Terra, devemos primeiramente usar a equação (4.19) para determinar o efeito que o peso do foguete causará na velocidade final do mesmo. Considerando-se um lançamento vertical com relação à superfície e por tanto $\cos\gamma = 1$, temos:

$$\delta V_g = -9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 280s = -2.746 \frac{m}{s} \quad (4.37)$$

A velocidade orbital da carga útil será a v_p final do foguete menos δv_g e é obtida usando a equação (4.20):

$$v_o = 10.448,83 \frac{m}{s} - 2746,00 \frac{m}{s} = 7.702,83 \frac{m}{s} \quad (4.38)$$

Pode-se assim determinar a velocidade orbital para uma distancia de $327km$ da superfície da Terra, conforme estabelecidos nos parâmetros da tabela (2), para verificar a validade dos calculos feitos no modelo do foguete, ou seja:

$$v_o = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2} 5,97 \cdot 10^{24} kg}{6,371 \cdot 10^6 m + 3,27 \cdot 10^5 m}} = 7,702 \cdot 10^3 \frac{m}{s} \quad (4.39)$$

A modo de informação vale citar que o índice de carga útil do foguete Vostok 8K72K, que levou Iuri Gagarin ao espaço em 12 de abril de 1961, tinha um índice de massa de carga útil $\lambda = 0,016$, isto implica que para colocar na mesma orbita, a carga util do modelo usado neste trabalho seria necessário um foguete com uma massa inicial de $281.375,00$ kg.

5 LANÇADEIRA ESPACIAL MAGLEV - LEM

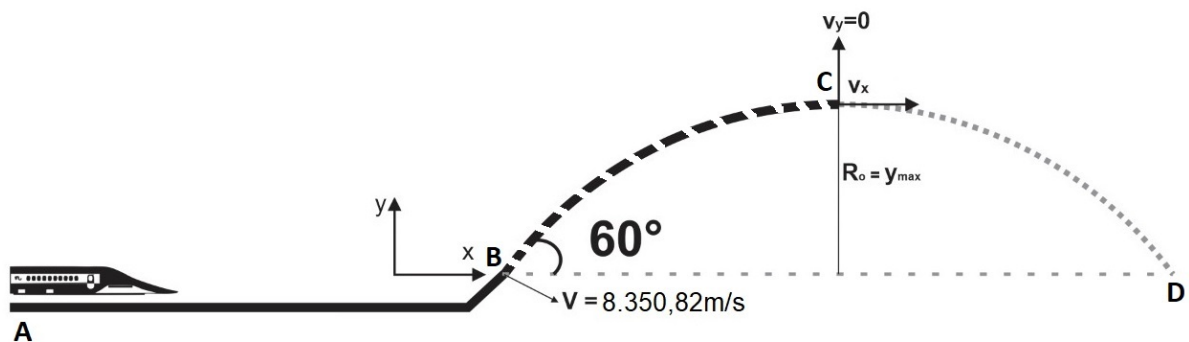
Neste capítulo discutiremos os parâmetros físicos e matemáticos de um modelo de lançadeira espacial usando sistemas Maglev que seja capaz de colocar em órbita a m_u da tabela (2). Para isso aproximaremos o modelo da LEM ao de um pequeno trem carregando no seu interior uma carga útil e se deslizando acima de uma ferrovia usando sistemas Maglev. E a hipotética pista onde se deslocará a LEM foi aproximada a um modelo de ferrovia Maglev construída em linha reta e possuindo no final uma rampa inclinada com um ângulo α em relação à superfície local da Terra. Uma vez que o veículo deixe a rampa de lançamento, sua dinâmica será aproximada à de um projétil com movimento oblíquo, cuja altura máxima será o raio da órbita em relação à superfície da Terra.

5.1 LEVITAÇÃO MAGNÉTICA E ESTABILIDADE

O estudo dos movimentos do modelo da LEM na pista será feito seguindo os mesmos parâmetros usados na dinâmica dos trens Maglev atualmente em serviço em alguns países da Europa e Ásia. Neste sentido, segundo a literatura especializada uns dos primeiros requisitos neste tipo de veículos é a levitação sobre a pista. Uma vez feito isto, a maior preocupação é com a estabilidade, que de acordo com Liu, Long e Li (2015), por essência os sistemas de levitação eletromagnética são instáveis.

Estabilidade é definida como o equilíbrio de um corpo acima de uma superfície, sem ter contato através de um meio sólido ou fluido com a mesma. Este fenômeno pode ser alcançado usando eletricidade, forças magnéticas ou a pressão do ar. Para os objetivos deste trabalho, discutiremos os princípios de levitação usando forças elétricas e magnéticas. Porém para se

Figura 6 – Esboço fora de escala de um modelo de lançadeira espacial. A: Início da pista de levitação e propulsão, B: Final da pista e rampa de decolagem, C: liberação da carga útil na órbita estabelecida. D: ponto de chegada da LEM (Pista de pouso).



Fonte: elaborada pelo autor.

alcançar a estabilidade nos veículos usando levitação eletromagnética, temos que burlar alguns pressupostos do *teorema de Earnshaw*, o qual prova que não é possível obter levitação estática usando qualquer combinação de ímãs fixos ou cargas elétricas.

5.1.1 Teorema de Earnshaw

O principal problema encontrado na levitação magnética é explicado pelo Teorema de Earnshaw. Este teorema foi provado pela primeira vez em 1842, pelo matemático britânico Samuel Earnshaw (1805-1888). O qual aplica-se às forças da lei do inverso do quadrado (elétrica e gravitacional) e também às forças do campo magnético de materiais magnéticos e paramagnéticos ou qualquer combinação de ambos (exceto os materiais diamagnéticos)(EARNSHAW,1839). A partir deste teorema, cientistas de todo o mundo estudam exceções e formas de garantir a estabilidade de sistemas que utilizam o magnetismo para alcançar a levitação.

Na literatura são encontradas diversas soluções para este problema, entre elas podemos citar a técnica de *Feedback*, no qual se usa um sistema para detectar a posição do veículo com relação à ferrovia e assim variar a força dos eletroímãs. No entanto, este sistema tem que ser muito confiável, tornando-se complexo e economicamente custoso.

Outra solução aplicada em trens “maglev”, é a utilização de supercondutores ou outros materiais diamagnéticos. Porém esta solução não é viável economicamente pela necessidade de sistemas de resfriamento criogênico para manter os supercondutores na temperatura ideal, isto mais uma vez torna este sistema caro e complexo. Por outro lado, a solução mais recente que representa a mais nova e promissora abordagem ao problema da levitação magnética em um objeto móvel é a utilização de um campo oscilante.

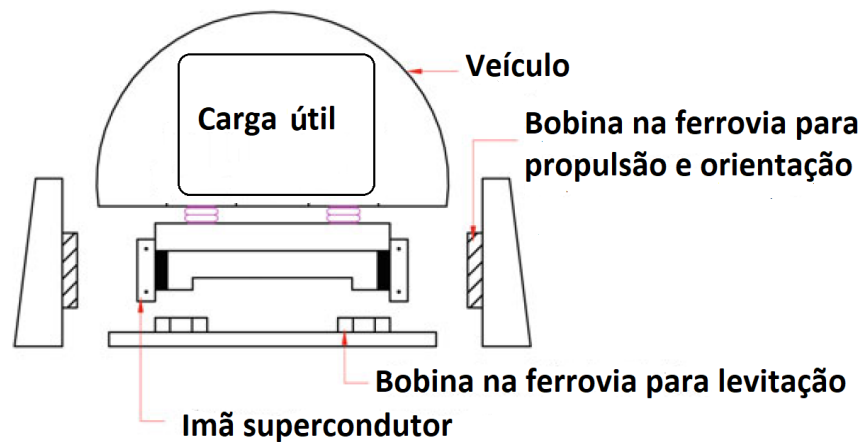
Nestes sistemas Maglev é induzida uma corrente alternada em um condutor e assim é gerada uma força de levitação. E isto acontece, porque ao passar uma corrente alternada através de um eletroímã, esta provoca um fluxo de correntes de Foucault para dentro de seu núcleo. Estas correntes pela sua vez, de acordo com a *lei de Lenz* fluem de modo a repelir um campo magnético próximo. Assim um eletroímã pode se comportar como um material diamagnético. Esta solução foi desenvolvida por Richard F. Post e sua equipe do Livermore National Laboratory e foi batizada como “Inductrack” devido a utilizar uma pista (track em inglês) formada com circuitos indutivos (POST, 2000).

5.2 INDUCTRACK

De todos os sistemas de levitação este é o que oferecer a melhor alternativa para ser usado numa hipotética lançadeira espacial, pelo fato de ser um sistema viável economicamente, funcionar a temperatura ambiente e estar na fronteira do desenvolvimento de tecnologias Maglev e pertence à técnica EDS.

Estudos mostraram que para trens de alta velocidade este sistema requer uma densidade

Figura 7 – Esboço fora de escala de uma LEM, vista de um corte transversal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

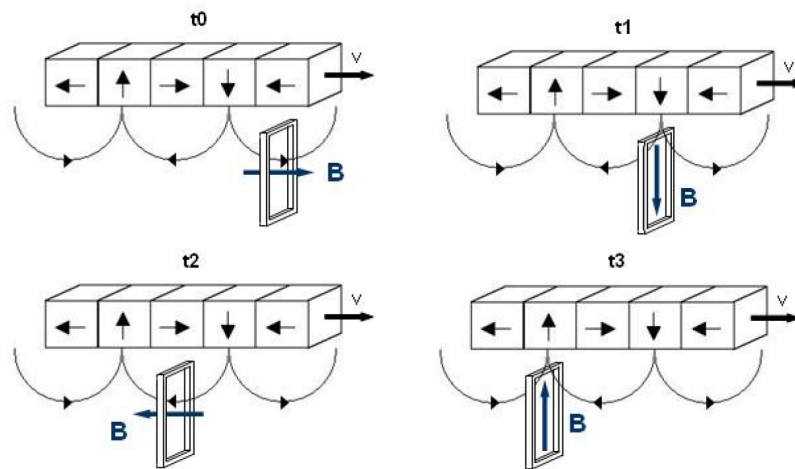
de fluxo magnético $\geq 1T$, para ser viável e somente eletroímãs supercondutores D.C. (Corrente alternada) são adequados para este sistema, porque os supercondutores de A.C. (Corrente Contínua) têm uma perda de histerese relativamente alta. A natureza decrescente da força de arrasto, com o aumento da velocidade como será visto nos gráficos da imagem (17), torna os sistemas EDS mais viáveis e seguros para trens de alta velocidade em relação aos sistemas de levitação eletromagnética (EMS) que usam a atração entre os polos opostos de ímãs permanentes e é aplicada particularmente nos trens Maglev que funcionam a baixas velocidades.

O método Inductrack pode ser descrito com base nas leis de *Faraday* e *Lenz*. Deste modo a resistência do campo magnético devido à velocidade relativa entre o veículo e a ferrovia induz uma corrente de Foucault nas bobinas localizadas na ferrovia, a qual segundo a lei de Lenz irá se opor ao campo magnético criado pelo ímã supercondutor móvel, produzindo assim forças repulsivas e de arrasto entre o trem e a pista.

como mencionado anteriormente, o Inductrack pertence à classe de sistemas de levitação denominada *Suspensão eletrodinâmica* ou repulsiva, mais conhecida na literatura especializada como **EDS** (electrodynamic Suspension). A força necessária para a levitação nos sistemas EDS é conseguida graças a forças repulsivas entre eletroímãs no veículo e correntes de Foucault induzidas na ferrovia, criadas a medida que o veículo com os ímãs permanentes se desloca por cima da mesma. Deve-se acrescentar que nestes sistemas, o movimento do veículo é um requisito crucial para a obtenção da força de suspensão.

A dinâmica da força de levitação e arrasto em função da velocidade, indicam que a velocidades mais baixas a força resultante pode não ser suficiente para levantar o veículo. A velocidade no ponto onde a força de arrasto é igual à força de levitação ($F_L = F_D$) é conhecida

Figura 8 – Campo magnético variando de acordo com a posição da matriz Halbach.



Fonte: Seminari, 2009.

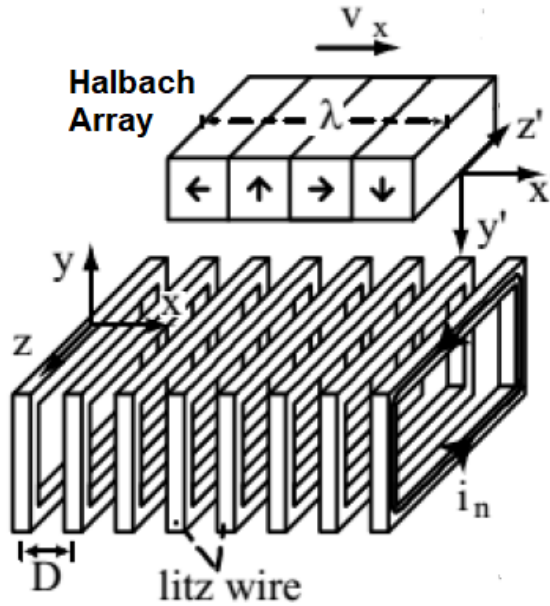
como velocidade de transição v_t . Por isso, em veículos que usam EDS, uma suspensão auxiliar de rodas é necessária para deslocamentos com valores $< v_t$. Porém uma vez que o sistema consegue a levitação, a mesma será sustentada de forma estável enquanto a velocidade for mantida acima da v_t .

Esta tecnologia em sistemas Maglev foi desenvolvida por Richard F. Post, do Livermore National Laboratory em 1999, todas as patentes e a maior parte da literatura existente ao respeito pertencem a este laboratório. Para Post (2000), o conceito “Inductrack” depende basicamente de dois componentes principais, um ou mais arranjos de ímãs permanentes capazes de produzir um campo oscilante e uma pista formada por um arranjo de circuitos indutivos que irão interagir com o campo e gerar a força de levitação. Este novo método ainda está em desenvolvimento e apesar de existir protótipos confiáveis, ainda não possui versões comerciais.

No sistema Inductrack emprega-se ímãs permanentes no veículo em movimento para maximizar as F_L graças a uma combinação de dois elementos, primeiro, os ímãs permanentes no veículo são organizados em uma matriz de "Halbach"(HALBACH, 1985). Em segundo lugar a pista é composta por circuitos elétricos com bobinas usando geometria retangular. Estes circuitos parecem otimizar o campo magnético da matriz de Halbach, como resultado com este sistema consegue-se uma F_L da ordem $4,0 \times 10^4 \text{ kg}$ por metro quadrado de matriz Halbach.

Segundo Post (1999), o resultado de levitação mencionado anteriormente pode ser conseguido usando ímãs de $NdFeB$, cuja massa pode ser de apenas 2% da massa total do veículo. Uma das maiores vantagens deste sistema é que o teorema de Earnshaw não se aplica e por conseguinte não requer nenhum circuito de controle para alcançar a estabilidade enquanto o trem estiver em movimento e quando estiver em repouso, pode-se usar um suporte auxiliar de rodas para apoiar-se na pista. Para uma LEM seria necessário o uso de rodas apenas num primeiro instante, levando em consideração que ela não precisara parar no final da pista.

Figura 9 – Esquema simplificado de um trilho Inductrack de circuitos verticais "window frame track".



Fonte: STORSET,2005.

O funcionamento básico do conceito Inductrack se dá por meio da variação do fluxo magnético que atravessa os circuitos indutivos posicionados na pista. Como a tensão é igual à variação deste fluxo, à medida que o arranjo magnético se move sobre a pista o campo oscilante funciona como uma fonte de tensão alternada. Na figura (8) é mostrado como o campo magnético varia de acordo com a posição da matriz de Halbach sobre a pista Inductrack.

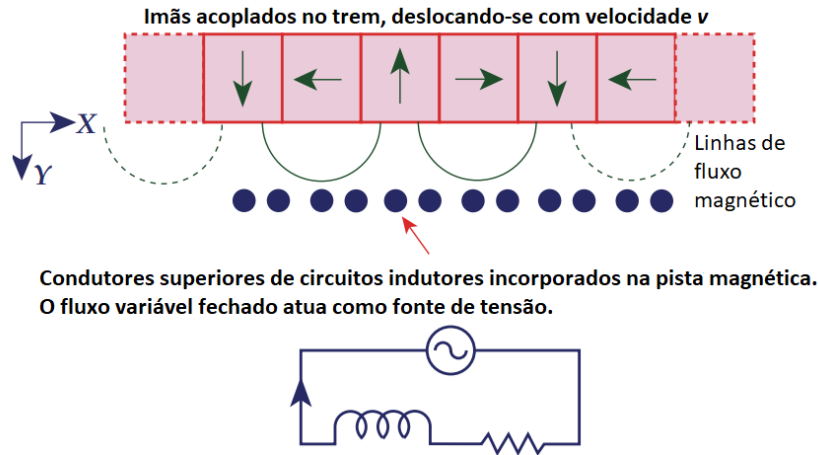
As forças de levitação e arrasto podem ser deduzidas usando as equações de Maxwell e a teoria padrão do circuito elétrico. O ponto de partida para a análise é a equação para a tensão e correntes induzidas num circuito típico de uma ferrovia maglev, ou seja:

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI = \omega \phi_0 \cos(\omega t) \quad (5.1)$$

Onde V (volts) é a tensão induzida, I (Amperes) é a corrente induzida, L (hy) é a indutância da "ferrovia" (auto-indutância mais o efeito de acoplamento indutivo a circuitos adjacentes), R (ohms) é a resistência dos circuitos da pista, e ϕ_0 (Tesla/m²) é o pico de fluxo acoplado ao circuito devido à passagem da matriz de Halbach acima do circuito. A frequência de excitação ω (rad/s.) é definida pelo comprimento de onda, λ (m.) do campo gerado pela matriz de Halbach e v (m/s) é a velocidade em relação à pista através da relação $\omega = kv$, onde $k = 2\pi/\lambda$. A solução para um estado permanente para a equação (4.5) é:

$$I(t) = \frac{\phi_0}{L} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2} \right] \sin(\omega t) + \left(\frac{R}{\omega L}\right) \cos(\omega t) \quad (5.2)$$

Figura 10 – Diagrama esquemático do conceito de um circuito do sistema Inductrack



Fonte:POST; DYUTOV, 2000.

Como pode ser visto a partir da equação (5.2), quando a frequência de excitação for muito maior do que a relação R/L , isto é $\omega \gg R/L$ (para velocidades substancialmente maior que a velocidade de transição) a fase da corrente é deslocada em 90 em relação à tensão induzida, entrando em fase com o fluxo, maximizando a F_L e minimizando F_D .

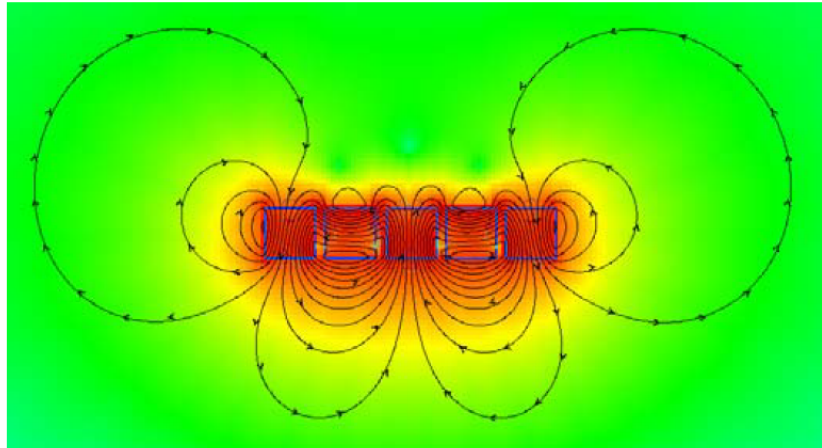
Uma representação esquemática de um veículo usando a técnica Inductrack acima dos condutores fechados da ferrovia é mostrado na Fig.(12). A orientação individual dos ímãs numa matriz Halbach é para concentrar as linhas de campo abaixo a matriz e quase cancelar o campo acima da mesma. Uma simulação das linhas campo magnético abaixo de uma matriz Halbach é mostrado esquematicamente na figura (11). O fluxo magnético associado liga-se ao circuitos para produzir correntes que então interagem de volta com o componente horizontal do campo para produzir a força de levitação.

5.2.1 Matriz de Halbach

Uma matriz Halbach é uma combinação especial de ímãs permanentes arranjados de tal forma, com o objetivo de reforçar o campo magnético de um lado da matriz e eliminar por interferência o campo magnético do lado oposto, de modo a criar um forte campo magnético *senoidal* em apenas uma fase. As linhas de fluxo para um Arranjo de Halbach podem ser visualizadas na figura (11). O Arranjo ou matriz de Halbach foi criado por Klaus Halbach para aplicação em aceleradores de partículas.

Segundo Halbach(1985), se restringirmos a análise apenas para a primeira harmônica do sistema, podemos obter equações mais simples que representam uma boa aproximação do campo magnético ou seja, com isso obtemos o campo magnético gerado pelo arranjo de Halbach

Figura 11 – Simulação do campo magnético produzido por uma Matriz Halbach.



Fonte: Friend, 2004

nos eixos horizontal x e vertical y .

$$B_x = B_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) e^{-ky} \quad (5.3)$$

$$B_y = B_0 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) e^{-ky} \quad (5.4)$$

Sendo B_x o campo na direção paralela ao arranjo e B_y o campo na direção perpendicular ao arranjo.

5.2.2 Pista Inductrack

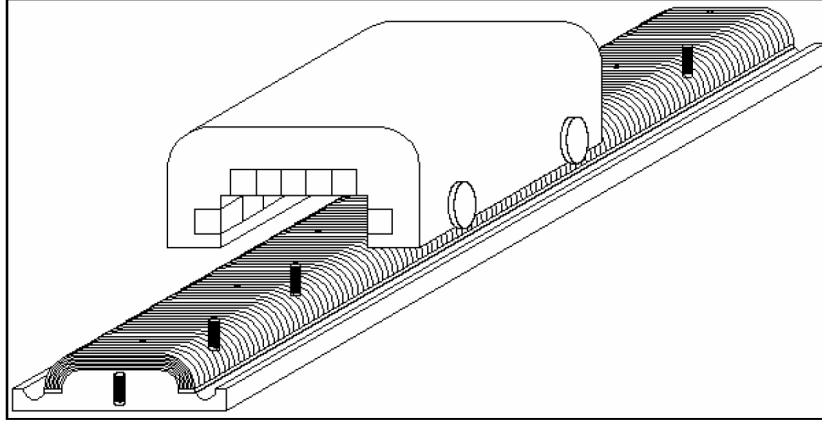
Nos sistemas Inductrack o trilho deve permitir a passagem de uma corrente induzida, grande o suficiente para gerar um campo magnético com magnitude capaz de provocar a levitação do veículo ligado à matriz de Halbach.

Existem diversos métodos de construção de trilhos Inductrack desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Lawrence Livermore, sendo dois os principais o "ladder track" (trilho em escada ou trilho laminado) e o "window frame track" (trilho em janelas). Neste trabalho focaremos o estudo apenas no "window frame track", escolhido devido a sua capacidade de suportar e gerar força de suspensão a altas velocidades requisito crucial para nossos objetivos. Nestas pistas são colocadas muitas bobinas isoladas entre si e formando um circuito fechado. O comportamento do conjunto de circuitos condutores pode ser modelados com uma boa aproximação por um circuito RL (Figura 10).

5.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS FORÇAS DE LEVITAÇÃO E ARRASTO

Para calcular F_L e F_D usamos como base a teoria da matriz de Halbach como derivada por seu inventor (HALBACH, 1985), na qual as componentes horizontal (x) e vertical (y) do

Figura 12 – Modelo da pista de um sistema Maglev usando o método Inductrack.



Fonte: Friend, 2004.

campo magnéticos de uma matriz Halbach planar é dado pelas expressões:

$$B_x = B_0 \sin(kx) \exp[-k(y_1 - y)] \quad (5.5)$$

$$B_y = B_0 \cos(kx) \exp[-k(y_1 - y)] \quad (5.6)$$

Aqui y_1 (m) é a distância vertical entre a superfície inferior da matriz Halbach e a centroide dos condutores superiores da pista, B_0 é a força máxima do campo magnético na superfície da série Halbach, dada pela expressão:

$$B_0 = B_r [1 - \exp(-kd)] \frac{\sin \frac{\pi}{M}}{\frac{\pi}{M}} \quad (5.7)$$

Nesta expressão B_r (Tesla) é o remanescente do campo magnético dos ímãs permanentes, d (m.) é a espessura da matriz Halbach, M é o número de ímãs por matriz Halbach.

Ao mesmo tempo, assumindo que a espessura dos condutores do circuito, d_c (m.), são muito menores que um comprimento de onda da matriz Halbach, especificamente que $d_c \ll k^{-1}$ e integrando a expressão para B_x sobre a área do circuito dá uma expressão para o fluxo por cada circuito ligado, ou seja:

$$\phi = \frac{wB_0}{k} \exp(-ky_1) \sin(kx) [1 - \exp(-kh)] \quad (5.8)$$

Nesta expressão, o termo $\exp(-kh)$ representa um termo de correção da ligação de fluxo de linhas do campo que passam abaixo dos circuitos e normalmente é um valor muito pequeno, por isso será ignorado no que se segue. Inserindo esta expressão para o fluxo na equação (5.2), e substituindo $x = vt$, encontramos uma equação para a corrente induzida (na direção transversal z) em termos dos parâmetros do ímã da ferrovia, temos:

$$I_z(t) = \frac{\lambda B_0 w}{2\pi L} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2} \right] \sin(kx) + \left(\frac{R}{\omega L}\right) \cos(kx) \frac{\text{ampers}}{\text{circuit}} \quad (5.9)$$

Esta corrente interage com os componentes horizontais e verticais do campo magnético para produzir a força de levitação e de arrasto:

$$F_y = I_z B_x w \left(\frac{\text{Newton}}{\text{circuit}} \right) \quad (5.10)$$

$$F_x = I_z B_y w \left(\frac{\text{Newton}}{\text{circuit}} \right) \quad (5.11)$$

Avaliando essas expressões ao longo do comprimento de onda encontra-se a media das forças de levitação e de arrasto, dadas pelas expressões:

$$\langle F_y \rangle = \frac{B_0^2 w^2}{2kL} \frac{\exp(-2ky_1)}{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2} \text{Newtons} \quad (5.12)$$

$$\langle F_x \rangle = \frac{B_0^2 w^2}{2kL} \frac{\frac{R}{\omega L} \exp(-2ky_1)}{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2} \text{Newtons} \quad (5.13)$$

Onde w (m) é a largura da matriz de Halbach, y_1 é a distância entre a superfície inferior do arranjo de Halbach e a superfície superior da “pista”, B (Tesla) é o campo máximo na superfície da matriz e depende do campo residual nos elementos magnéticos (B_r), e k é definida por $k = 2\pi/\lambda$. Para ímãs de NdFeB em laboratórios já foram conseguidos B_r de aproximadamente 1,41 Tesla.

A razão F_L/F_D pode ser obtida imediatamente dividindo a equação (5.12) pela equação (5.13), ou seja:

$$\frac{F_L}{F_D} = \frac{\langle F_y \rangle}{\langle F_x \rangle} = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi v}{\lambda} \left[\frac{L}{R} \right] \quad (5.14)$$

A razão $\frac{F_L}{F_D}$ aumenta linearmente com a velocidade. A literatura sugere como método para melhorar a proporção entre F_L e F_D o uso de circuitos com bobinas de geometria retangular. Esta expressão pode ser usada para avaliar a eficiência de levitação, que é a força de levitação em newtons por watt que pode ser dissipada na ferrovia. Como a potência média $\langle P \rangle$ (Watts) dissipada por circuito é dado pelo produto $v \langle F_x \rangle$, encontramos

$$K = \frac{\langle F_y \rangle}{\langle P \rangle} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{L}{R} \right] \frac{N}{W} \quad (5.15)$$

Comparando a equação (5.15) para a eficiência de energia e a equação (5.12) para a F_L , vemos que para qualquer R dada ao circuito, podemos obter qualquer grau de eficiência desejado, adicionando o carregamento de indutância para os circuitos, mas, necessariamente na despesa de reduzir a força de elevação por circuito. Essas equações também podem estar relacionadas à v_T . De acordo com as equações (4.18) vemos que a v_T está relacionada à eficiência de levitação, uma vez que é essa a velocidade onde o produto $Kv = 1.0$. Para circuitos sem carga indutiva adicional, os valores típicos de K são de ordem 1,0 N / W. isto, significa que é necessário uma energia da ordem de 10kW para levar 1 tonelada.

Para encontrar F_L por unidade de área de Halbach a grandes velocidades em comparação com v_T que avaliamos na equação (5.14), nesse limite observa-se que o número de circuitos pelo comprimento de um metro de ferrovia é $(1/d)$, e a área por metro de comprimento da ferrovia é igual a w , de modo que:

$$\frac{\Sigma < F_Y >}{A} = \frac{B_0^2 w}{2kLd_c} \exp(-2ky_1) \frac{N}{m^2} \quad (5.16)$$

No caso de não haver adição de carga indutiva aos circuitos, o termo indutivo L é composto da auto-indutância de cada circuito modificado pelas indutâncias mútuas referentes às malhas adjacentes, formando o que chamamos de "indutância de indutância" e é dado pela expressão a seguir:

$$L_d = \frac{\mu_0 P_c}{2kd_c} \text{ Henrys} \quad (5.17)$$

Neste trabalho corrigimos o parâmetro P_c da equação (5.17) Proposta inicialmente pelo criador do sistema Inductrack (Post) e substituímos pelo parâmetro w , por oferecer uma maior eficiência para a configuração de circuitos usados para o objeto de estudo.

$$L_d = \frac{\mu_0 w}{2kd_c} \text{ Henrys} \quad (5.18)$$

Na equação (5.17) $P_c(m)$ é o perímetro de um circuito da pista e na equação (5.18) w é a largura da matriz Halbach. No caso da necessidade de um aumento da indutância visando reduzir a velocidade de transição, pode-se optar pelo uso de ferrites. Assim o cálculo da indutância passa a ser dado por:

$$L = L_L + L_D \quad (5.19)$$

Onde L é a indutância total, L_D é a indutância adicionada e L_L é a indutância líquida, o valor de L_L pode ser calculada da seguinte maneira:

$$L_L = L_D \frac{h}{P_c} (Q - 1) \quad (5.20)$$

Onde h é a largura transversal das ferrites e Q representa o efeito das ferrites em aumentar a indutância e no limite de maior permeabilidade $\mu \gg \mu_0$ é dado pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{\exp\left(\frac{ka}{2}\right) + \exp\left(\frac{-ka}{2}\right)}{\exp\left(\frac{ka}{2}\right) - \exp\left(\frac{-ka}{2}\right)} \quad (5.21)$$

Onde a é a espessura da região da pista envolvida pela ferrite. Por outro lado, a expressão para F_L por unidade de área é dada por:

$$\frac{\Sigma < F_y >}{A} = \frac{B_0^2}{\mu_0} \left[\frac{w}{P_c} \right] \exp(-2ky_1) \frac{N}{m^2} \quad (5.22)$$

Tabela 3 – Parâmetros físicos para o modelo de Lançadeira Espacial Maglev, proposta neste trabalho.

01	B_r	1,41	Tesla	Campo magnético do ímã
02	d	0,05	m	Espessura do ímã
03	M	4	ímãs	Ímãs por comprimento de onda Halbach
04	λ	0,40	m	Comprimento de onda Halbach
05	w	0,20	m	Largura da matriz Halbach
06	l_m		m	Comprimento da Matriz Halbach
07	M_{Lem}	6.000	kg	massa total da LEM (Estrutura + m_u)
08	m_u	4.725	Kg	massa da carga útil

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Parâmetros físicos para o modelo da pista de lançamento da LEM, proposta neste trabalho.

01	Δ_c	0,003	m	Altura do pacote do condutor
02	d_c	0,015	m	No espaçamento da faixa do centro
03	P_c	0,60	m	Perímetro do circuito
04	r_c	1,36	ohms/m	Resistividade elétrica do AWG
05	N_t	50	m	Numero de voltas do fio condutor por circuito
06	N_s	1	camadas	Número de camadas laminadas
07	y_1	0,01	m	Distancia entre a pista e a LEM

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 PARÂMETROS FÍSICOS DA LEM E PISTA DE LANÇAMENTO

Os valores dos parâmetros das tabelas (3) e (4) foram escolhidos pelo autor especificamente para cumprirem o requisito de acelerar um veículo, o qual ao deixar a rampa tenha uma velocidade suficiente para chegar à órbita estabelecida na tabela (2) sem usar nenhum sistema de propulsão extra, as configurações da pista e da LEM foram estabelecidas seguindo as recomendações da literatura usada ao longo deste trabalho.

Uma vez definido os parâmetros das tabelas (3) e (4), pode-se primeiramente calcular o valor de k, ou seja:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{6,28}{0,40m} = 15,7m^{-1} \quad (5.23)$$

Da equação (5.7), obtemos o valor do campo magnético B_0 :

$$B_0 = B_r[1 - \exp(-kd)] \frac{\sin \frac{\pi}{M}}{\frac{\pi}{M}} = 1,4T[1 - e^{(-\frac{4\pi \times 0,005m}{0,70m})}] = 1,00T \quad (5.24)$$

Usando a equação (5.18) calculamos a indutância distribuída como sendo:

$$l_d = \frac{(4 \frac{\pi \times 10^{-7}}{m} \cdot \frac{hy}{m})(0,20m)}{2(15,7m^{-1})0,015m} = 5,34 \times 10^{-6}hy \quad (5.25)$$

Definindo o parâmetro "a" que segundo Post(1999), pode-se usar $a = d_c = 0,015m$, e com a

equação (5.21) podemos encontrar o parâmetro Q :

$$Q = \frac{\exp(\frac{15,7m^{-1}(0,015m)}{2}) + \exp(\frac{-15,7m^{-1}(0,015m)}{2})}{\exp(\frac{15,7m^{-1}(0,015m)}{2}) - \exp(\frac{-15,7m^{-1}(0,015m)}{2})} = 9,09 \quad (5.26)$$

Com os dados da equação (5.26), usando $h = y_1 - 0,1m$ e substituindo na equação (5.20) obtemos a indutância líquida L_L

$$L_L = 5,34 \times 10^{-6} hy \frac{0,1m}{0,60m} (9,09 - 1) = 7,15 \times 10^{-6} hy \quad (5.27)$$

agora podemos calcular a indutância total de acordo com a equação (5.19), ou seja:

$$L = L_L + L_D = 12,49 \times 10^{-6} \quad (5.28)$$

Pode-se calcular a resistência do circuito R que use uma bonina de um fio AWG wire, de acordo Post (1996), temos:

$$R = \frac{(1,36 \frac{ohms}{m})(0,60)}{50(150)} = 1,08 \times 10^{-4} ohms \quad (5.29)$$

Pode-se medir a eficiência da LEM usando os resultados das Equações (5.28), (5.29) e substituindo na equação (5.15) para encontrar o valor do parâmetro K , ou seja:

$$K = 15,7m^{-1} \left[\frac{12,49 \times 10^{-6} hy}{1,08 \times 10^{-4} ohms} \right] = 1,81 \frac{N}{W} \quad (5.30)$$

Com estes parâmetros pode-se deduzir o valor da velocidade v_t da LEM em relação à pista, ou seja:

$$v_t = \frac{1}{K} \cong 0,55 \frac{m}{s} \quad (5.31)$$

5.4.1 Cálculo de alguns parâmetros do sistema para a velocidade de transição da LEM

Os cálculos seguintes foram feitos para a velocidade de transição (v_t) da LEM em relação à pista. Assim, procede-se a calcular a força máxima por área (assumindo que $A = 1m^2$) adquirida pelo sistema, ou seja:

$$\frac{F_{max}}{1m^2} = \frac{(1,00T)^2}{4\pi \times 10^{-7} \frac{hy}{m}} \exp[-15,7m^{-1}(0,023m)] \frac{N}{m^2} = 0,55 \times 10^8 \frac{N}{m^2} \quad (5.32)$$

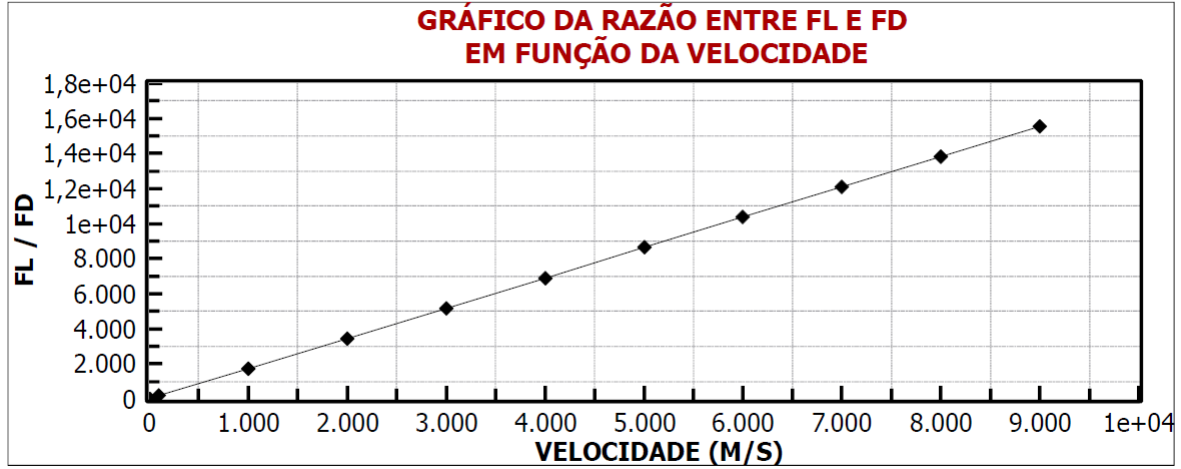
Agora vamos usar o valor de v_t obtido na equação (5.31) para calcular o valor de ω , no instante em que a LEM começa a levantar, ou seja $v = v_t$:

$$\omega = \frac{2\pi}{\lambda} v = \frac{6,28}{0,40m} 0,55 \frac{m}{s} = 8,63 \frac{rad}{s} \quad (5.33)$$

Com a LEM movendo-se a aproximadamente $0,55m/s$, a relação entre as forças de levitação e arrasto é igual a um, ou seja:

$$\frac{F_L}{F_D} = \omega \frac{L}{R} = 1 \quad (5.34)$$

Figura 13 – Proporção entre a força de levitação e arrasto em função da velocidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste instante a força de levitação e de arrasto são iguais, mas se aumentar a velocidade da LEM a força de Levitação será muito superior à de arrasto. Por exemplo, para $v = 8.350,82 \text{ m/s}$ que será a velocidade no final da pista, temos a seguinte proporção:

$$\frac{F_L}{F_D} = \omega \frac{L}{R} = \left(\frac{2\pi}{0,40\text{m}} \right) 8.350,82 \frac{\text{m}}{\text{s}} \left[\frac{12,49 \times 10^{-6} \text{hy}}{1,08 \times 10^{-4} \text{ohms}} \right] = 14.421,86 \quad (5.35)$$

Os resultados da equação (5.35) estão plotados no gráfico da figura (13), variando o parâmetro V . Agora usando as equações (5.5) e (5.7) e o valor obtido na equação (5.24) podemos calcular respectivamente o campo magnético na direção x , paralela a matriz de Halbach e na direção y , considerando apenas o primeiro harmônico ou seja:

$$B_x = 1,00\text{T} \sin(15,7\text{m}^{-1} 0,55\text{m.s}) e^{[(15,7\text{m}^{-1}) 0,01\text{m}]} = 0,13\text{T.s} \quad (5.36)$$

$$B_y = 1,00\text{T} \cos(15,7\text{m}^{-1} 0,55\text{m.s}) e^{[(15,7\text{m}^{-1}) 0,01\text{m}]} = 0,87\text{T.s} \quad (5.37)$$

Usando a equação (5.8) podemos calcular o fluxo magnético por metro quadrado.

$$\phi = \frac{0,20\text{mT}}{15,7\text{m}^{-1}} e^{[(15,7\text{m}^{-1}) 0,01\text{m}]} \sin(15,7\text{m}^{-1} 0,55\text{m.s}) = 1,65 \times 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{m}^2} \quad (5.38)$$

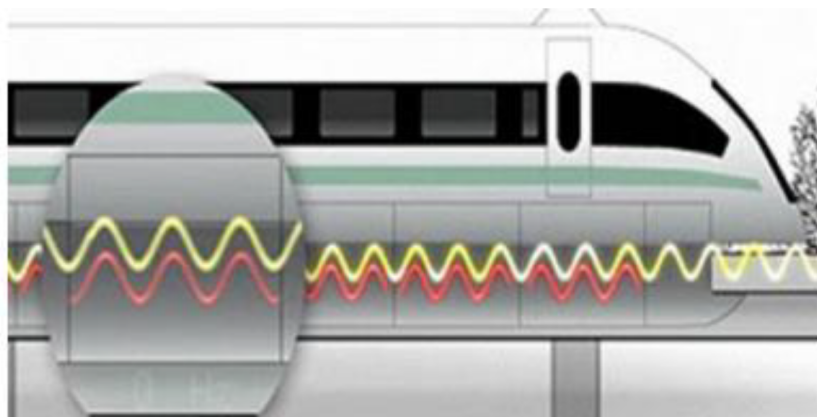
Com a equação (5.9) pode-se calcular a corrente I_z na direção transversal, ou seja:

$$I_z(t) = \frac{0,08\text{Tm}^2}{7,84 \times 10^{-7} \text{hy}} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{1,08 \times 10^{-4} \text{ohms}}{8,63 \frac{\text{rad}}{\text{s}} 125 \times 10^{-7} \text{hy}} \right)^2} \right] \sin(8,63\text{s}) = 74 \frac{\text{Ampers}}{\text{Circuito}} \quad (5.39)$$

5.5 PROPULSÃO E GUIA LATERAL

A pista Maglev além das bobinas localizadas acima da pista que servem para a levitação do trem, também contem dois tipos de bobinas em formato de 8 em pequenas paredes laterais

Figura 14 – Forma senoidal dos campos magnéticos gerados pelo sistema Maglev.



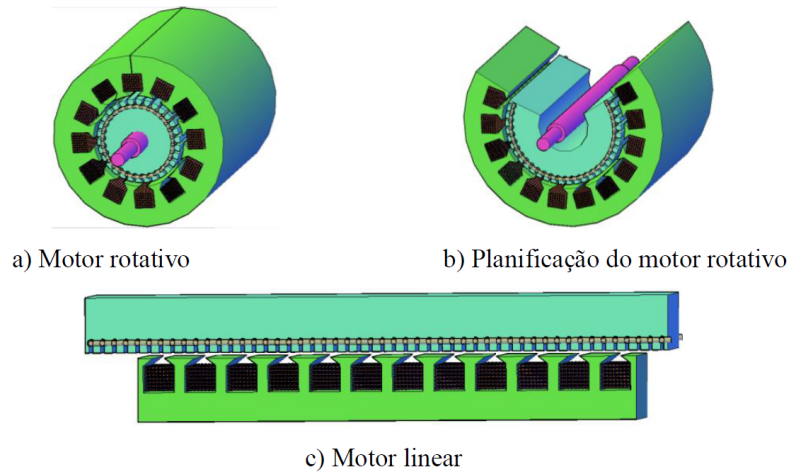
Fonte: Friend, 2004.

localizadas a cada lado da pista, as quais servem para centralizar o trem sobre a pista e acelerar o mesmo. Assim, a matriz Halbach localizada nos trens (e aplica-se a LEM estudada neste projeto) induz uma corrente nas bobinas em formato de um 8 deitado nas laterais da pista e com base nestes sinais um sistema computacional detectam a localização do trem em tempo real e insere correntes alternadas nas bobinas de propulsão, produzindo uma série alternada de pólos magnéticos Norte e Sul, que puxam e empurram os ímãs supercondutores e aceleram o trem acima da pista como visto em YADAV (2013), Friend (2004) e Liu, Long e LI (2015). Um diagrama simplificado deste conceito está esboçado na figura (16).

Ao contrário dos trens tradicionais, nos trens Maglev e no modelo aqui estudado, o mecanismo de propulsão não está localizado no veículo, mas sim nos trilhos, conforme mostrado na figura (7). Segundo YADAV (2013), Friend (2004) e Liu, Long e LI (2015), neste meio de transporte como mencionado anteriormente as forças de repulsão e de atração geradas são responsáveis pela aceleração do veículo. As bobinas existentes na lateral dos trilhos são alimentadas por uma corrente trifásica, provocando um deslocamento do campo magnético no corredor como observado na figura (16).

Essa mudança na polaridade das bobinas determina o campo magnético localizado na frente do trem para puxar o veículo para a frente, enquanto o campo magnético traseiro gera uma repulsão que é uma força adicional na mesma direção. O sistema que permite este tipo de movimento é conhecido como motor síncrono linear e é utilizado em todos os trens Maglev atualmente construídos. Segundo o Bulletin of the Transilvania University of Braşov (2015) esta tecnologia permitirá num futuro próximo velocidades de locomoção para trens de passageiros superiores a 6437km/h em túneis de vácuo.

Figura 15 – Esquema simplificado de um motor linear.



Fonte: Boldea, 2013.

5.5.1 Dinâmica da LEM na pista de lançamento

Conforme visto anteriormente os sistemas Maglev se locomovem graças à utilização de um motor síncrono linear. Para os objetivos propostos aqui seria necessário um motor capaz de gerar uma força resultante que permita ao menos uma aceleração equivalente a 30 g, como sugerido por Powell, Maise e Charles (2013), nestas condições para uma LEM com uma massa total de 6.000 kg e desprezando os efeitos do ar (por não ter a precisão da geometria da LEM) podemos deduzir a força resultante, ou seja:

$$F_r = m \cdot a = 6000 \text{ kg} \cdot 294,3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.765.800 \text{ N} \quad (5.40)$$

Usando o valor da aceleração da equação (5.40), usando as equações da cinemática, é possível deduzir que o comprimento desde o início da pista até o final da rampa de lançamento deve ser de 118.511,5 m. Assim podemos encontrar a velocidade final nesse trajeto, ou seja:

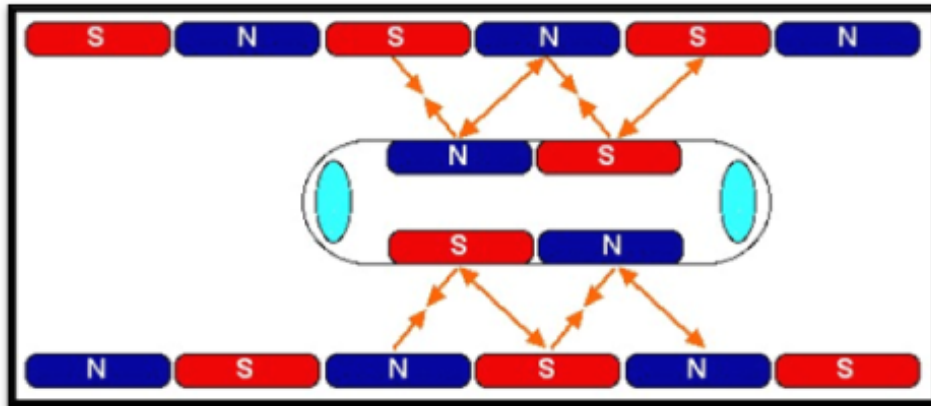
$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta S = 2(294,3) \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 118.511,5 \text{ m} = 8.352,03 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \quad (5.41)$$

Devido às proporções e objetivos deste trabalho, não foi estudado os detalhes e implicações físicas da rampa de lançamento localizada no final da pista, pois como ela deve possuir uma suave inclinação e comprimento dela é muito menor que o da pista, para os calculos foi aproximado todo o trajeto para uma reta horizontal. Uma vez que a LEM deixe a rampa de lançamento o estudo será feito seguindo as equações do movimento de projetis.

Se aproximarmos a dinâmica da LEM ao do movimento de um corpo unidimensional podemos encontrar o trabalho realizado pela força ao longo da pista (na figura (6) o trajeto de A até B) e considerando que a força seja contante, temos:

$$W_{A \rightarrow C} = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = (118.511,50 \text{ m}) 1.675.800 \text{ N} = 1,98 \times 10^{11} \text{ J} \quad (5.42)$$

Figura 16 – Princípio de propulsão de um sistema Maglev.



Fonte: YADAV, 2013.

Com estes dados pode-se estimar de forma grosseira a potencia dissipada no sistema de propulsão, ou seja:

$$P = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (5.43)$$

Onde v é a velocidade instantânea da LEM em relação à pista. Com esta equação podemos fazer uma estimativa superficial da potencia dissipada no final da rampa de lançamento, ou seja:

$$P = 1.675.800N(8.350,82 \frac{m}{s}) = 1,39 \times 10^{10} \text{ watts} \quad (5.44)$$

O valor desta equação nos dá uma estimativa do consumo em termos energéticos, mesmo aproximando o valor da potencia para um valor constante ao longo da pista veríamos que esse consumo é mínimo, por conta de ser por um curto período de tempo, fator que tornaria o sistema viável. Aproximando-se o modelo para o de um corpo pontual, teremos:

$$v = v_o + at \quad (5.45)$$

Ou em valores numéricos:

$$t = \frac{8350,82 \frac{m}{s}}{294,3 \frac{m}{s^2}} = 28,38s \quad (5.46)$$

Assim o consumo de energia do sistema mostrado na equação durante o lançamento da LEM, seria aproximadamente durante um período de meio minuto.

5.5.2 Movimento balístico

Para fins de simplicidade do modelo e pelo fato de $r_o \ll r_t$ optamos, por não levar em consideração a curvatura da superfície da Terra e seus movimentos de rotação e translação, nos estudos do movimento da LEM da pista de lançamento até o momento em que deixara a carga útil na órbita (ficando os estudos orbitais apenas para a dinâmica da carga útil, que não é o objetivo deste trabalho, pois estamos apenas preocupado em deixar a carga útil no espaço na

órbita definida na tabela (2) e não nos movimentos orbitais descrita pela mesma). Neste sentido, a força gravitacional g será considerada constante. Partindo destas condições, os movimentos descritos pela LEM ao sair da rampa de lançamento serão equivalentes aos de um projétil, ou seja seus movimentos serão descritos numa componente horizontal (eixo x) e outro na vertical (eixo y).

Sabendo que $r_o = 327.000m$ com relação à superfície da Terra, fazendo $r_o = y_{max}$ e definindo $\alpha = 60$. Pode-se definir a velocidade inicial v_0 do veículo na hora de deixar a rampa de lançamento e que deve ser o mesmo resultado encontrado na equação (5.41), ou seja:

$$v_0 = \sqrt{\frac{y_{max}2g}{\sin^2 60}} = 8.350,82 \frac{m}{s} \quad (5.47)$$

Usando o resultado da equação (5.47) e o valor α agora pode-se definir a velocidade inicial no eixo y v_{0y} , da seguinte maneira:

$$v_{0y} = v_0 \sin 60 = 7.232,02 \frac{m}{s} \quad (5.48)$$

Usando o resultado da equação (5.47), os valores de α e g pode-se agora estimar o tempo necessário para a LEM deixar a carga útil na órbita estabelecida na tabela (2), ou seja:

$$t = \frac{8.350,82 \frac{m}{s} \sin 60}{9,81 \frac{m}{s^2}} = 737,38s \quad (5.49)$$

E Finalmente, usando o resultado da equação (5.50) e o valor de α , pode-se obter o valor da velocidade na componente horizontal v_{0x} , ou seja:

$$v_{0x} = v_0 \cos 60 = 4.175,41 \frac{m}{s} \quad (5.50)$$

Para fins práticos, pode-se considerar os resultados da equação (5.50) como sendo a velocidade na qual a m_u chegará em órbita. Mas, de acordo com o resultado da equação (4.39), esta velocidade é inferior à necessária para entrar em órbita ao redor da Terra. Por tanto, seria necessário o impulso de um pequeno propulsor químico para ser atingida dita velocidade. Este propulsor pode ser o mesmo que seria usado para manobras orbitais e correção da trajetória.

6 ANÁLISE DOS DADOS

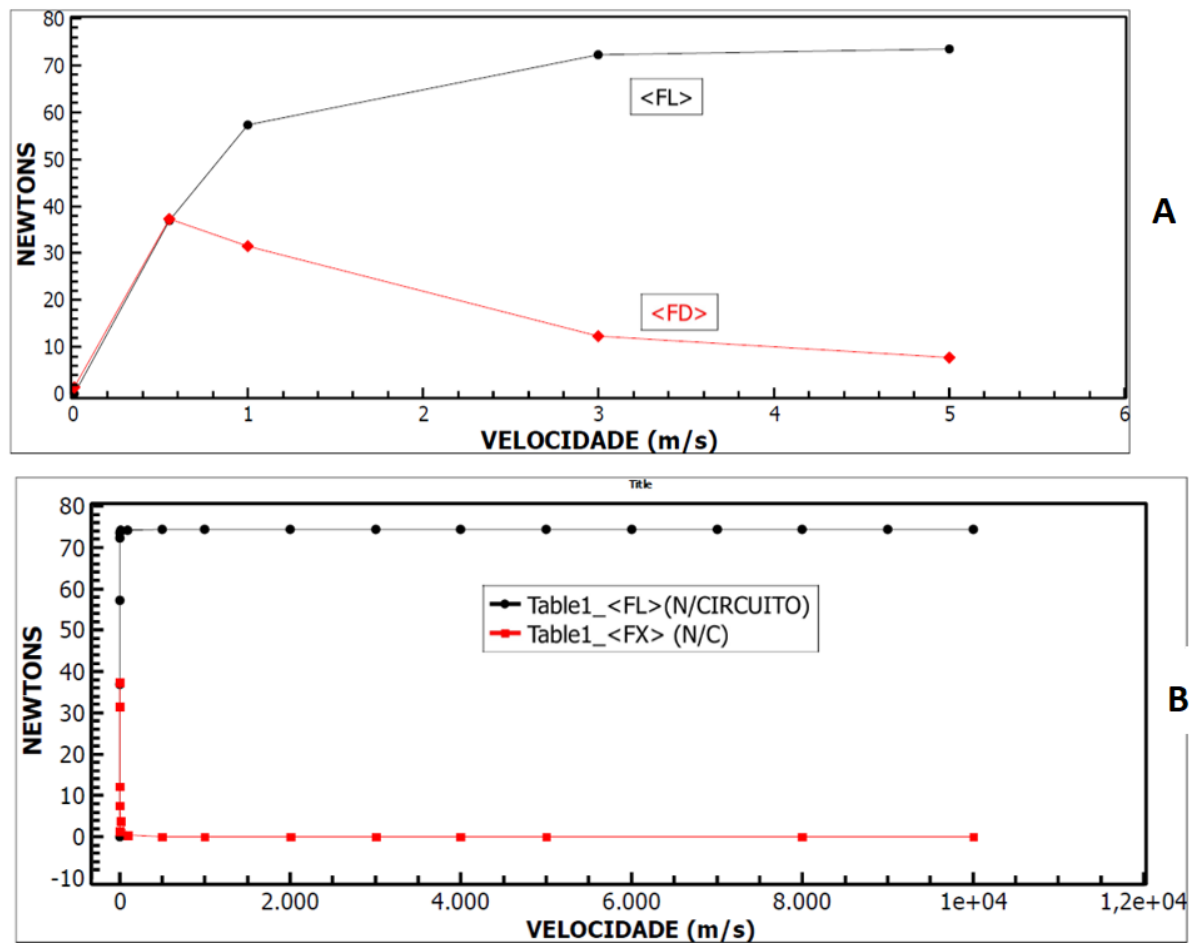
Nesta seção analisaremos alguns pontos discutidos no capítulo anterior, começando pelos resultados das equações (4.21) e (4.30) as quais nos mostram claramente que seguindo os parâmetros da tabela (2), uma carga útil de $4.725kg$, só pode ser colocada no espaço por um foguete de três estágios. O qual, é um sistema muito mais complexo que um foguete com a mesma massa de um único estágio, pois requer no mínimo três motores, sistemas de liberação dos estágios, maior dificuldade na montagem e maior probabilidade de algum sistema falhar durante a missão. Estas equações explicam porque países como o Brasil, mesmo com varias instituições de tecnologia espacial (ITA, IMPE, AEB, etc) não conseguem construir um foguete confiável para deixar cargas uteis no espaço.

Por outro lado, sabemos que, para levantar a massa da LEM proposta neste trabalho seria necessária uma $F_L > 58.860N$ e pela equação (5.12), podemos deduzir que para isso ser possível, a LEM tem que possuir uma matriz de Halbach com uma área semelhante à ocupada por um numero próximo de 1000 circuitos indutivos.

Outro ponto que merece análise, é figura (18), onde o gráfico (a) é uma ampliação do gráfico (b), no qual foram plotados as medias da força de levitação e arrasto respectivamente ($\langle F_y \rangle$ e $\langle F_x \rangle$), para isso usamos as equações (5.12) e (5.13). Neste gráfico, observa-se que nossos resultados estão em conformidade com a literatura, Pois o comportamento de ditas forças são as mesmas que nos trabalhos de (), () e (). No inicio, a força de arrasto é maior que a de levitação, e ela, tem um crescimento até o modelo alcançar a velocidade de transição. Neste ponto, a força de Levitação e arrasto são iguais. Em seguida, a medida que aumenta a velocidade relativa entre o modelo e a pista, a F_D tende para zero, enquanto a F_L a partir de velocidade de aproximadamente $10m/s$ torna-se praticamente constante.

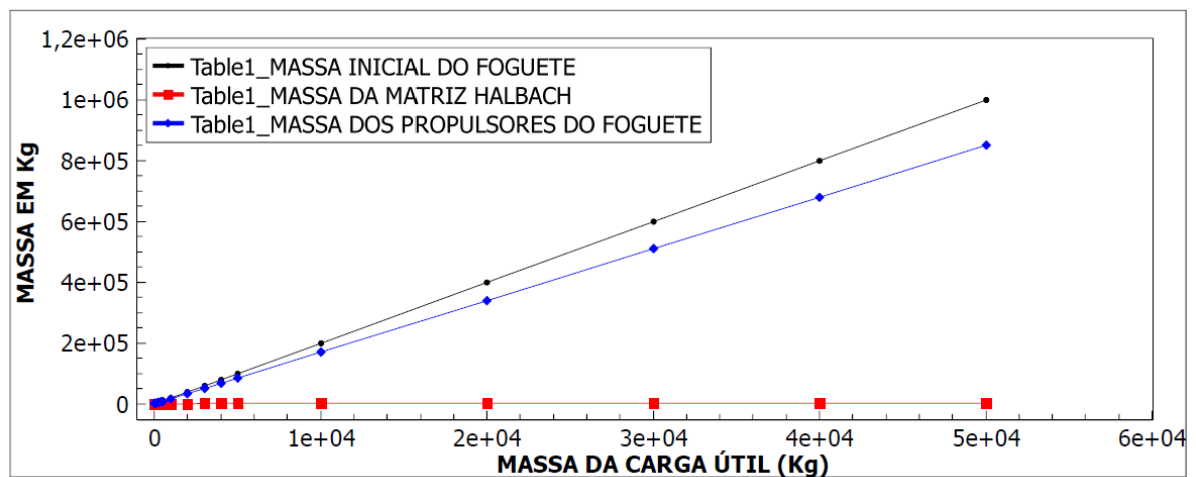
No gráfico da figura (19), podemos ver o crescimento linear da massa inicial (massa da carga útil + massa da estrutura + massa dos propulsores) de um foguete espacial em relação ao aumento da massa da carga útil. Isto é, para colocar em orbita uma carga útil (equipamentos ou pessoas) de $50.000kg$ é necessário um foguete com uma massa inicial de $1.000.000kg$, da qual ao menos $850.000kg$ é a massa dos propulsores, que são produtos com um custo elevado, de difícil armazenamento, potencialmente perigoso para manuseios e altamente agressivos ao meio ambiente.

Estes propulsores durante a combustão são transformados em produtos tóxicos que são descartados na atmosfera. A exemplo, nas décadas anteriores, cada missão com o Ônibus Espacial da NASA descartava na atmosfera perto de 20.000 toneladas de gases poluentes, os quais. Esta é outras das razões pelas quais explorar o espaço é uma atividade gigantesca cara e poluente.

Figura 17 – Comportamento das forças de levitação F_L e de arrasto F_D em função da velocidade.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 – Comportamento da massa inicial e massa dos propulsores de um foguete, assim também como a massa de uma matriz Halbach, plotados em função da variação da massa útil.



Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Custo por missão e custo por kg de massa colocada em órbita de alguns foguetes utilizados nos Estados Unidos e na Rússia.

Veículo	Custo* \$	Capacidade m_u *	custo \$/kg
Pegasus	10,5-15,4	369 kg	32.366 \$/kg
Delta 117920	45,0-50,0	5.040 kg	9.426 \$/kg
Atlas IIA	80,0 - 90,0	7.122 kg	11.935 \$/kg
Titan IV	170,0 - 230,0	17.690 kg	11.306 \$/kg
Space Shuttle	350,0 - 547,0	24.356 kg	18.413 \$/kg
Vostok 8K72K	18,0 - 33,0	4.725 kg	—
Soyuz	40,0- 50,0	3.200	15.625 \$/kg
Falcon Heavy	90,0 - 150,0	64.000 kg	1.407 \$/kg

Fonte: Adaptado de LONDON, 1994.

Por outro lado, a tecnologia atual no campo de sistemas Maglev permite que a massa da matriz Halbach, seja apenas de dois por cento da massa total levitada (POST, 1996), ou seja, para levitar uma massa de uma lançadeira espacial como a proposta neste trabalho, com uma massa de carga útil de 50.000kg e 10.000kg de massa de estrutura e sistemas (já incluído a própria matriz de Halbach), seria necessário uma matriz de ímãs de apenas 1.200kg, mais o consumo energético por alguns segundos durante o trajeto na pista de decolagem.

Outro item que merece são os resultados óbitos pela equação (5.33), que inesperadamente levou a dedução de que, uma boa parte da pista e na rampa de lançamento a LEM passaria por uma grande vibração, causada pelo comportamento *senoidal* do campo magnético gerado pela Matriz de Halbach e os circuitos indutivos da pista, a qual, a depender da amplitude poderia destruir o sistema LEM-Pista. Por outro lado, a história revela que um problema similar já foi superado com os foguetes espaciais, as ondas de choque e as ondas sonoras geradas pelos propulsores, refletidas pela plataforma de decolagem, seriam capazes de destruir a estrutura do foguete. Mas, este problema é contornado jogando jatos de água que servem de amortecimento.

Também merece discussão os custos econômicos por missão dos principais foguetes utilizados nos Estados Unidos de América e na Rússia, os quais estão descritos na tabela (5).

Na tabela (5), o custo* é dado em milhões de dólares, m_u significa a capacidade de colocar cargas no espaço numa órbita de até 500km em relação à superfície da Terra. Daqui percebe-se o elevado custo das missões espaciais mesmo para uma órbita próxima da superfície da Terra, estes valores do custo \$/kg crescem drasticamente quando se trata de missões interplanetárias. Por outro lado, na atualidade o custo em kW/hora no Brasil em média é de R\$0,50, ou em dólares daria algo em torno de \$1,65 e isto mais uma vez justifica porque num futuro deveria se investir mais em sistemas Maglev para a exploração espacial, pois devido ao pouco tempo de consumo de energia, os preços por quilograma de massa colocada no espaço seriam muito mais baixos que os descritos anteriormente.

7 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do exposto no capítulo anterior deste trabalho pode-se deduzir que, a Física permitirá num futuro não muito distante usar uma lançadeira espacial com sistemas Maglev para colocar cargas úteis no espaço. Embora, num começo essas cargas úteis sejam limitadas a sistemas de equipamentos e não sistemas biológicos devido à aceleração sofrida na pista de decolagem, como visto na equação (5.40). Mas, certamente cientistas e engenheiros encontrarão formas de contornar esse problema, assim como diminuir a vibração gerada a grandes velocidades. Não obstante, ainda somos conscientes que falta tecnologia para cumprir alguns requisitos exigidos para este objetivo, a mesma, que em um futuro próximo estará disponível.

Por outro lado, sabemos que a tecnologia Maglev para transportes é segura, confortável e economicamente viável. Pois, o maior investimento é na construção da pista, uma vez feito isso, devido à ausência de atrito entre o Trem e a pista o custo por manutenção dos sistemas e consumo energético são mínimos. Além de causar uma baixíssima poluição sonora e uma ínfima agressão ao meio ambiente. No caso do modelo proposto neste trabalho, poderia ser construída uma pista subterrânea, para uma maior segurança de operação, podendo inclusive ser retirado o ar do interior do túnel com o objetivo de conseguir uma maior aceleração e na saída deste, poderia usar-se na frente da nave espacial a mesma tecnologia usada em escudos térmicos, que são usados hoje na reentrada atmosférica pelas espaçonaves.

Pode-se observar que mesmo com a tecnologia existente hoje em dia, a colocação de uma carga útil de porte médio no espaço, com sistemas Maglev seria dezenas de vezes mais econômica que com a atual geração de foguetes. E uma das maiores vantagens seria, uma vez construída a pista, poderiam ser feitos vários lançamentos num mesmo dia, pois não requereria muitos preparativos para preparar um lançamento, basta colocar a carga útil na LEM. Assim, uma das maiores vantagens de usar lançadeiras espaciais com sistemas Maglev, seria que os propulsores(bobinas) estariam localizados na pista, fixos na superfície da Terra, desta forma tamanho e peso não seriam problema. Pois, eles não fazem parte da LEM, enquanto que nos foguetes convencionais a massa dos propulsores faz parte da massa inicial do foguete.

No passado a principal fonte de propulsão dos trens também era o fogo igual que é agora dos foguetes, eles consumiam enormes quantidades de carvão para gerar vapor de água, que graças a alta pressão conseguiam ativar um sistema de locomoção e agora como exposto ao longo deste trabalho os trens já usufruem da tecnologia Maglev. Com tudo, uma das aplicações mais imediatas deste trabalho será a utilização em sala de aula, com um exemplo de contextualização do uso prático do conhecimento do eletromagnetismo, quem sabe isto venha a inspirar jovens alunos a um dia se tornarem grandes cientistas e que venham cumprir os objetivos propostos aqui.

REFERÊNCIAS

- 1 BERGERON, D. *Holloman High Speed Test Track Maglev Program Update* *The Holloman High Speed Test Track Magnetically Levitated (MAGLEV) Sled Six Degree-of-Freedom Model* *Holloman High Speed Test Track Maglev Program Update*. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 978-1-60086-965-5. Nenhuma citação no texto.
- 2 CHERTOK, B.; DIVISION, N.; SIDDIQI, A. *Rockets and People, Volume III: Hot Days of the Cold War (NASA History Series. NASA Sp-2009-4110)*. [S.l.]: Books Express Publishing, 2010. ISBN 9781780394121. Nenhuma citação no texto.
- 3 COOPERATION, O. for E.; DEVELOPMENT. *PISA 2015 Results: Policies and Practices for Successful Schools*. [S.l.]: OECD, 2017. (PISA 2015 results). ISBN 9789264267497. Nenhuma citação no texto.
- 4 Earnshaw, S. On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, v. 7, p. 97–112, 1848. Nenhuma citação no texto.
- 5 FILHO, E. *Política espacial brasileira: a política científica e tecnológica no setor aeroespacial brasileiro*. [S.l.]: Editora Revan, 2002. ISBN 9788571062313. Nenhuma citação no texto.
- 6 FLEISCH, D. *A Student's Guide to Maxwell's Equations*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2008. ISBN 9781139468473. Nenhuma citação no texto.
- 7 FRIEND, P. *Magnetic Levitation Train Technology 1*. Dissertação (Mestrado) — Bradley University, 2004. Nenhuma citação no texto.
- 8 FRISH, S.; TIMOREVA, A. *Curso de física general*. [S.l.]: Mir, 1981. Nenhuma citação no texto.
- 9 GIL, A. *Como elaborar projetos de pesquisa*. [S.l.]: Atlas, 2010. ISBN 9788522458233. Nenhuma citação no texto.
- 10 GRIFFITHS, D. *Introduction to Electrodynamics*. [S.l.]: Prentice Hall, 1999. ISBN 9780138053260. Nenhuma citação no texto.
- 11 HARLAND, D.; CATCHPOLE, J. *Creating the International Space Station*. [S.l.]: Springer, 2002. (Space Exploration). ISBN 9781852332020. Nenhuma citação no texto.
- 12 LAW, J.; RENNIE, R. *Dictionary of Physics*. [S.l.]: Oxford University Press, 2015. (Oxford quick reference). ISBN 9780198714743. Nenhuma citação no texto.
- 13 LINEAR Electric Machines, Drives, and MAGLEV's Handbook. [S.l.]: Taylor and Francis Group, 2013. Nenhuma citação no texto.
- 14 LIU, Z.; LONG, Z.; LI, X. *Maglev Train Overview*. [S.l.: s.n.], 2015. 1-28 p. ISBN 978-3-662-45672-9. Nenhuma citação no texto.

- 15 LONDON, J.; INST., A. U. M. A. A. R. *LEO on the Cheap. Methods for Achieving Drastic Reductions in Space Launch Costs*. [S.l.]: Defense Technical Information Center, 1994. Nenhuma citação no texto.
- 16 NICOLAIDE, A. *Electromagnetics: General Theory of the Electromagnetic Field, Classical and Relativistic Approaches*. [S.l.]: Transilvania University Press, 2012. ISBN 9786061901135. Nenhuma citação no texto.
- 17 OSTERMANN, F.; PUREUR, P. *Supercondutividade*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2005. (Temas Atuais de Física). ISBN 9788588325340. Nenhuma citação no texto.
- 18 PISA PISA 2006 Technical Report. [S.l.]: OECD Publishing, 2009. (PISA). ISBN 9789264048096. Nenhuma citação no texto.
- 19 PISA PISA 2009 Technical Report. [S.l.]: OECD Publishing, 2012. (PISA). ISBN 9789264167872. Nenhuma citação no texto.
- 20 PISA PISA 2012 Results: What Students Know and Can Do (Volume I) Student Performance in Mathematics, Reading and Science: Student Performance in Mathematics, Reading and Science. [S.l.]: OECD Publishing, 2013. ISBN 9789264201118. Nenhuma citação no texto.
- 21 POOLE, C. et al. *Superconductivity*. Elsevier Science, 2014. (Elsevier insights). ISBN 9780124166103. Disponível em: <>. Nenhuma citação no texto.
- 22 POST, R.; RYUTOV, D. The inductrack concept: A new approach to magnetic levitation. p. 1–87, 05 1996. Nenhuma citação no texto.
- 23 POST, R. F.; RYUTOV, D. D. The inductrack: a simpler approach to magnetic levitation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 10, n. 1, p. 901–904, March 2000. ISSN 1051-8223. Nenhuma citação no texto.
- 24 PUMFREY, S.; TILLEY, D. William gilbert: forgotten genius. *Physics World*, v. 16, n. 11, p. 15, 2003. Nenhuma citação no texto.
- 25 SÉRIE Didática, Física 3: Eletromagnetismo. [S.l.]: Imprensa Universitária da UFSM, 2012. Nenhuma citação no texto.
- 26 SERWAY, R.; JEWETT, J. *Física Para Cientistas E Engenheiros, V.3: ELETRICIDADE E MAGNETISMO*. CENGAGE DO BRASIL. ISBN 9788522111107. Nenhuma citação no texto.
- 27 SPACEX. *REUSABILITY*. 2018. Disponível em: <<http://www.spacex.com/news/2013/03/31/reusability-key-making-human-life-multi-planetary>>. Nenhuma citação no texto.
- 28 STARTRAM: The New Race to Space. [S.l.]: Shoebox Press, 2013. Nenhuma citação no texto.
- 29 STORSET, O. F.; PADEN, B. Discrete track electrodynamic maglev part i: Modelling. p. 1–38, 8 2005. Nenhuma citação no texto.
- 30 SUTTON, G. *Rocket Propulsion Elements ... Third edition. [With illustrations.]*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1963. Nenhuma citação no texto.
- 31 WALTER, E. *Cambridge Advanced Learner's Dictionary*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2018. ISBN 9783125179882. Nenhuma citação no texto.

-
- 32 YADAV NIVIRITTI MEHTA, A. G. A. C. . D. V. M. M. Review of magnetic levitation (maglev): A tecnologia to propel vehicles with magnets. *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics*, 2013. Nenhuma citação no texto.
- 33 YAGHOUBI, H. The most important maglev applications. *Journal of Engineering*, 2013. Nenhuma citação no texto.

ANEXO A – MODELAGEM MATEMÁTICA E FÍSICA DE UM FOGUETE DE TRÊS ESTÁGIOS

A.1 RAZÃO DAS MASSAS DE UM FOGUETE COM PROPULSORES QUÍMICOS

Segundo, Curtis (2014), a relação das razões da massa da estrutura/massa inicial $\pi_e = \frac{m_e}{m_0}$; massa do propelente/massa inicial $\pi_p = \frac{m_p}{m_0}$ e a massa da carga útil/massa inicial $\pi_u = \frac{m_u}{m_0}$, podem ser expressado da seguinte maneira:

$$\pi_e + \pi_p + \pi_u = 1 \quad (\text{A.1})$$

Pode-se definir um parâmetro λ em função da razão entre a massa da carga útil e a massa da estrutura somada com a massa do propulsor do foguete, ou seja:

$$\lambda = \frac{m_u}{m_e + m_p} = \frac{m_u}{m_0 - m_p} \quad (\text{A.2})$$

De forma semelhante pode-se definir um parâmetro ε em função razão entre a massa da estrutura dividida pela soma da massa dos propulsores e a massa da estrutura, matematicamente temos:

$$\varepsilon = \frac{m_e}{m_e + m_p} = \frac{m_e}{m_0 - m_u} \quad (\text{A.3})$$

Partindo a suposição que toda a massa do propulsor é consumida, podemos escrever N_t em função de λ e ε e levando em consideração que λ , ε e N_T , não são independentes entre si, pode-se expressar a massa da estrutura do foguete da seguinte maneira:

$$m_e = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} m_p \quad (\text{A.4})$$

De forma semelhante, a massa da carga útil, pode ser escrita também em função da massa da estrutura e da massa do propulsor:

$$m_u = \lambda(m_e + m_p) = \lambda\left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} m_p + m_p\right) = \frac{\lambda}{1 - \varepsilon} m_p \quad (\text{A.5})$$

Pode-se escrever N_t da em função da massa da carga útil e da massa da estrutura da seguinte maneira:

$$N_t = \frac{1 + \lambda}{\varepsilon + \lambda} \quad (\text{A.6})$$

Assim, dado qualquer valor de dois, das três relações, λ , ε e N_t pode-se obter valor da terceira razão. Deste modo, quando a massa dos propelentes for esgotada, obtêm-se a velocidade de propulsão do foguete

$$v_p = I_{sp} g_0 \ln N_T = I_{sp} g_0 \ln\left(\frac{1 + \lambda}{\varepsilon + \lambda}\right) \quad (\text{A.7})$$

A partir da equação (A.7) é possível deduzir que o maior valor para v_p , acontece quando $m_u = 0$, contudo o que se procura é maximizar a capacidade de levar carga útil ao espaço, mantendo uma

massa mínima para a estrutura. Mas, segundo Howard D. Curtis (2014), a massa da estrutura, os motores, e todos os componentes de um foguete não podem ser feitos arbitrariamente pequenas. A Tecnologia de materiais atual, coloca um limite inferior em ε de cerca de 0,1. Para este valor estrutural a relação da massa da carga útil será $\lambda = 0,05$.

O I_{sp} de um foguete químico típico é de cerca de 300s, o qual pode proporcionar apenas uma $v_p = 5,7 \frac{km}{s}$. O I_{sp} mínimo requerido para uma única fase em órbita é de 416s. Este valor, é obtido somente por motores que usam como propelentes hidrogênio / oxigênio líquido. No entanto, esses são os sistemas mais avançados disponíveis na atualidade, tendo um custo econômico elevado, além da perigosidade no manuseio. Por isso, os construtores de foguetes optaram por desenvolver foguetes multi-estágio, sejam eles com estágios em serie ou paralelo ou a combinação de ambos.

MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM FOGUETE DE TRÊS ESTÁGIOS

Principalmente por simplicidade, neste trabalho será estudado o modelo de um foguete com estágios em serie e pelo mesmo motivo também será considerado a suposição (irreal) de que todos os estágios são semelhantes. Ou seja, cada estágio tem o mesmo I_{sp} , mesmo valor de ε e mesmo valor de λ . Deste modo, pode-se investigar o efeito dos estágios na velocidade final para uma determinada massa de carga útil, sendo π_u fração da carga geral, temos:

$$\pi_u = \frac{m_u}{m_0} \quad (A.8)$$

Para um veículo de um estágio único o índice da carga útil é

$$\lambda = \frac{m_u}{m_0 - m_u} = \frac{1}{\frac{m_0}{m_u} - 1} = \frac{\pi_u}{1 - \pi_u} \quad (A.9)$$

Pode-se expressar N_T em função dos parâmetros das massas, da seguinte maneira:

$$N_t = \frac{1}{\pi_u(1 - \varepsilon) + \varepsilon} \quad (A.10)$$

De acordo com a Equação (A.7), a velocidade de propulsão agora pode ser escrita assim:

$$V_p = I_{sp} g_0 \ln \frac{1}{\pi_u(1 - \varepsilon) + \varepsilon} \quad (A.11)$$

Seja m_0 a massa total de um foguete de dois estágios, temos:

$$m_0 = m_{01} \quad (A.12)$$

Deste modo, da carga útil do primeiro estágio é toda a massa m_{02} do segundo estágio. Assim, para o primeiro estágio, o índice de carga útil é:

$$\lambda_1 = \frac{m_{02}}{m_{01} - m_{02}} = \frac{m_{02}}{m_0 - m_{02}} \quad (A.13)$$

Para o segundo estágio o índice de carga útil é dado por:

$$\lambda_2 = \frac{m_u}{m_{01} - m_u} \quad (\text{A.14})$$

No caso de ser os dois estágios, $\lambda_1 = \lambda_2$, temos a seguinte relação

$$\frac{m_{02}}{m_0 - m_{02}} = \frac{m_u}{m_{02} - m_u} \quad (\text{A.15})$$

Resolvendo esta equação (A.15) para rendimentos de m_{02} , obtemos

$$m_{02} = \sqrt{m_0} \sqrt{m_u} \quad (\text{A.16})$$

No entanto, sabe-se que $m_0 = \frac{m_u}{\pi_u}$, então a massa bruta do segundo estágio é:

$$m_{02} = \sqrt{\frac{1}{\pi_u} m_u} \quad (\text{A.17})$$

Com este resultado obtemos para os dois estágios uma taxa de carga útil comum $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$, então:

$$\lambda_{2E} = \frac{\sqrt{\pi_u}}{\lambda - \sqrt{\pi_u}} \quad (\text{A.18})$$

Este resultado, juntamente com a Equação (A.10) e admitindo-se que $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ leva à relação de massa comum para cada estágio:

$$N_{T2E} = \frac{1}{\sqrt{\pi_u}(1 - \varepsilon) + \varepsilon} \quad (\text{A.19})$$

Supondo que o segundo estágio se acenda imediatamente após o esgotamento do primeiro, a v_p final do veículo de dois estágios é a soma das velocidades de propulsão de cada estágio individuais

$$v_p = v_{p1} + v_{p2} \quad (\text{A.20})$$

Ou substituindo-se a equação (A.11) pelas relações da equação (A.20) obtêm-se:

$$v_{p2} = I_{sp} g_0 \ln_{2E} + I_{sp} g_0 \ln_{2E} = 2 I_{sp} g_0 \ln_{2E} \quad (\text{A.21})$$

Mas, usando as relações da equação (A.21) obtêm-se esta nova relação:

$$v_{p2E} = I_{sp} g_0 \ln \left[\frac{1}{\sqrt{\pi_u}(1 - \varepsilon) + \varepsilon} \right]^2 \quad (\text{A.22})$$

Por outro lado, a massa da estrutura de cada estágio pode ser encontrada em termos da massa da carga útil usando o razão estrutural comum ε , deste modo pode se obter

$$\varepsilon = \frac{m_{e1}}{m_{01} - m_{02}}; \varepsilon = \frac{m_{e2}}{m_{02} - m_u} \quad (\text{A.23})$$

A massa da estrutura de cada estágio, para um foguete com dois estágios é dado da seguinte maneira:

$$m_{e1} = \frac{(1 - \sqrt{\pi_u})\varepsilon}{\pi_u} m_u; m_{e2} = \frac{(1 - \sqrt{\pi_u})\varepsilon}{\sqrt{\pi_u}} m_u \quad (\text{A.24})$$

Da mesma forma, podemos encontrar também, a massa de cada propulsor do foguete, através das seguintes relações

$$m_{p1} = m_{01} - (m_{e1} + m_{02}); m_{p2} = m_{02} - (m_{e2} + m_u) \quad (A.25)$$

Ou

$$m_{p1} = \frac{(1 - \sqrt{\pi_u})(1 - \varepsilon)}{\pi_u} m_u; m_{p2} = \frac{(1 - \sqrt{\pi_u})(1 - \varepsilon)}{\sqrt{\pi_u}} m_u \quad (A.26)$$

De forma similar, para um foguete de três estágios as relações dos índices de carga útil, são dados por

$$\lambda_1 = \frac{m_{02}}{m_{01} - m_{02}}; \lambda_2 = \frac{m_{03}}{m_{02} - m_{03}}; \lambda_3 = \frac{m_u}{m_{03} - m_u} \quad (A.27)$$

Partindo mais uma vez da suposição de que os estágios são semelhantes e conseqüentemente as razões de carga útil são todas iguais. Isto é, $\lambda_1 = \lambda_2$, $\lambda_1 = \lambda_3$ e lembrando que $m_{01} = m_0$, encontramos

$$m_{02}^2 - m_{03} - m_0 = 0; m_0 m_{03} - m_0 m_u = 0 \quad (A.28)$$

Por tanto as relações da equação (A.28) implicam que:

$$m_{02} = \frac{m_u}{\pi_u^{\frac{1}{3}}}; m_{03} = \frac{m_u}{\pi_u^{\frac{1}{3}}} \quad (A.29)$$

Substituindo-se esses resultados na equação (A.29), para as expressões para λ_1, λ_2 ou λ_3 , pode-se obter um índice de carga útil comum para um foguete de três estágios,

$$\lambda_{3e} = \frac{\pi_u^{\frac{1}{3}}}{1 - \pi_u^{\frac{1}{3}}} \quad (A.30)$$

Com este resultado encontramos o numero de Tsiolkovsky N_{T3e} , para um foguete de três estágios

$$N_{T3e} = \frac{1}{\pi_u^{\frac{1}{3}}(1 - \varepsilon) + \varepsilon} \quad (A.31)$$

De modo semelhante a equação (A.22) usada para um foguete de dois estágios, pode ser usada também para calcular a velocidade de propulsão da carga útil, num foguete de três estágios, $v_{pt} = v_{p1} + v_{p2} + v_{p3}$ então temos:

$$v_{p3} = 3I_{sp}g_0 \ln N_{T3e} = I_{sp}g_0 \ln \left(\frac{1}{\pi_u^{\frac{1}{3}}(1 - \varepsilon) + \varepsilon} \right)^3 \quad (A.32)$$

Conseqüentemente, o índice de massa estrutural é obtida de modo semelhante, partindo da suposição que seja semelhante em todos os estágios,

$$\varepsilon = \frac{m_{e1}}{m_{01} - m_{02}}; \varepsilon = \frac{m_{e2}}{m_{02} - m_{03}}; \varepsilon = \frac{m_{e3}}{m_{03} - m_u} \quad (A.33)$$

Para obter os valores da massa da estrutura de cada um dos estágios num foguete com três estágios em serie usa-se as seguintes equações:

$$m_{e1} = \frac{(1 - \pi_u^{\frac{1}{3}})\varepsilon}{\pi_u} m_u \quad (\text{A.34})$$

Para o segundo estágio temos:

$$m_{e2} = \frac{(1 - \pi_u^{\frac{1}{3}})\varepsilon}{\pi_u^{\frac{2}{3}}} m_u \quad (\text{A.35})$$

Para o terceiro estágio temos:

$$m_{e3} = \frac{(1 - \pi_u^{\frac{1}{3}})\varepsilon}{\pi_u^{\frac{1}{3}}} m_u \quad (\text{A.36})$$

Por outro lado, a massa do propulsor de cada um dos três estágios pode ser obtida das seguintes relações

$$m_{p1} = m_{01} - (m_{e1} + m_{02}) \quad (\text{A.37})$$

Para a massa do propulsor do segundo estagio temos:

$$m_{p2} = m_{02} - (m_{e2} + m_{03}) \quad (\text{A.38})$$

Para a massa do propulsor do terceiro estagio temos:

$$m_{p3} = m_{03} - (m_{e3} + m_u) \quad (\text{A.39})$$

ou também com as seguintes relações:

$$m_{p1} = \frac{(1 - \pi_u^{\frac{1}{3}})(1 - \varepsilon)}{\pi_u} m_u \quad (\text{A.40})$$

Para o segundo estágio:

$$m_{p2} = \frac{(1 - \pi_u^{\frac{1}{3}})(1 - \varepsilon)}{\pi_u^{\frac{2}{3}}} m_u \quad (\text{A.41})$$

E finalmente para o terceiro estágio;

$$m_{p3} = \frac{(1 - \pi_u^{\frac{1}{3}})(1 - \varepsilon)}{\pi_u^{\frac{1}{3}}} m_u \quad (\text{A.42})$$