



SENAI CIMATEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL
Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Dissertação de Mestrado

**Propulsão por Desbalanceamento de Massas
Rotativas**

Apresentada por: Roosevelt de Carvalho Regis
Orientador: Dr. Gilney Figueira Zebende
Co-orientador: Dr. Josemar Rodrigues de Souza

Novembro 2013

Roosevelt de Carvalho Regis

Propulsão por Desbalanceamento de Massas Rotativas

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, Curso de Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Área de conhecimento: Sistemas complexos

Orientador: Dr. Gilney Figueira Zebende
SENAI CIMATEC

Salvador, BA
SENAI CIMATEC
2013

Nota sobre o estilo do PPGMCTI

Esta dissertação de mestrado foi elaborada considerando as normas de estilo (i.e. estéticas e estruturais) propostas aprovadas pelo colegiado do Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial e estão disponíveis em formato eletrônico (*download* na Página Web http://ead.fieb.org.br/portal_faculdades/dissertacoes-e-teses-mcti.html ou solicitação via e-mail à secretaria do programa) e em formato impresso somente para consulta.

Ressalta-se que o formato proposto considera diversos itens das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entretanto opta-se, em alguns aspectos, seguir um estilo próprio elaborado e amadurecido pelos professores do programa de pós-graduação supracitado.

SENAI CIMATEC

Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leram e recomendam a aprovação [com distinção] da Dissertação de Mestrado, intitulada “Propulsão por Desbalanceamento de Massas Rotativas”, apresentada no dia (dia) de (mês) de (ano), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Orientador:

Prof. Dr. Gilney Figueira Zebende
SENAI CIMATEC

Co-Orientador:

Prof. Dr. Josemar Rodrigues de Souza
SENAI CIMATEC

Membro externo da Banca:

Prof. Dr. Marildo Geraldete Pereira
UEFS

Membro interno da Banca:

Prof. Dr. Marcelo A. M. S. Gonçalves
SENAI CIMATEC

Dedico este trabalho primeiramente ao meu DEUS, que me deu forças para concluí-lo,
em segundo lugar a minha esposa pelo apoio dispensado e por último e não menos
importante a minha filhinha, que me serviu de inspiração.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Dr. Gilney Figueira Zebende pela orientação, paciência e dedicação ao orientando, e por ter acreditado no trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Josemar Rodrigues de Souza pela co-orientação, apoio e paciência despendida durante o desenvolver do projeto de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Rodney Nascimento Guimarães pela paciência, orientação, incentivo e apoio despendido durante todo o desenvolver do projeto de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves pelo apoio e orientação, nos momentos de dúvidas e indecisões de quais caminhos seguir para melhor realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Hernane Borges de Barros Pereira pelo apoio psicológico, orientação organizacional e incentivo nos momentos difíceis, os quais não foram poucos.

Ao Prof. Dr. Marildo Geraldete Pereira pelas contribuições, que abrilhantaram o trabalho no seu percurso final.

Ao SENAI, por ter proporcionado os recursos para a elaboração da pesquisa.

Ao amigo José Carlos Criaes Souto Maior por ter apoiado a pesquisa nos momentos necessários.

Salvador, Brasil
16 de Novembro 2013

Roosevelt de Carvalho Regis

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo atestar que um veículo pode ser deslocado por forças oriundas do desbalanceamento de massas rotativas. Para tanto utilizamos em laboratório uma unidade móvel com rodas prototipada com base no modelo teórico aqui proposto. Este modelo funcionando, pode ser importante do ponto de vista da inovação tecnológica, pois quase todos propulsores existentes necessitam de interação convencional com o meio externo, ou seja, do tipo rodas, hélices, esteiras, jatos, entre outros. Neste tipo de tecnologia aqui aplicada, podemos colocar o propulsor em uma carcaça selada em um meio e mesmo assim conseguirmos o seu deslocamento em uma determinada direção.

Levando isto em consideração, abordamos nesta dissertação dois tipos de situação; uma onde as massas estão balanceadas (simétricas em boa parte de seu movimento) e uma com as massas permanentemente desbalanceadas. No primeiro caso, embora tenhamos conseguido deslocar a unidade móvel com sucesso, sua reprodutibilidade mostrou-se ineficiente. No segundo caso a reprodutibilidade do processo foi inquestionável, isto é, de fácil controle e domínio, porém com a desvantagem do móvel se mover de forma descontínua.

Logrando sucesso esta tecnologia, a mesma poderá ser aplicada nos dispositivos móveis imersos em meio fluidos altamente agressivos, como por exemplo ácidos. Finalmente, nossa intenção aqui não foi quantificar ou verificar parâmetros de otimização, mas sim verificar o funcionamento de uma unidade móvel propelida por forças oriundas de massas rotativas.

Palavras-chaves: Forças de Vínculos, Forças Centrífugas, Propulsor Centrifugo

Abstract

This dissertation aims to prove that a vehicle can be moved by forces originating from unbalanced rotating masses. In turn a mobile unit with prototype wheels based on our theory was experimented on in the laboratory. From the standpoint of technological innovation this model function may be important, considering that almost all existing conventional propellants require interaction with the external environment, i.e. the type of wheels, propellers, mats, jets, among others. The type of technology applied here allows us to put the engine in a closed housing and still be able to displace the unit to a determined direction.

Taking this into consideration, this paper discusses two types of situations, one where the masses are balanced and symmetrical during most of their movement and the other where the masses are always unbalanced. In the first case, we have succeeded in moving the movable unit, but reproducing the movement was unsuccessful. In the second case the reproducibility of the process was unquestionable, it was also easy to control and command. The disadvantage being that the unit moved discontinuously.

Achieving success with this technology, may allow this concept to be applied in mobile devices immersed amid highly aggressive fluids such as acids. Finally, our intention here was not to quantify or verify the optimization parameters, but verify the operation of a mobile unit propelled by forces arising from rotating masses.

Keywords: Links Forces, Forces Centrifuges, Centrifugal Propeller

Sumário

1	Introdução	1
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Revisão da Literatura	5
2.2	Conceitos Teóricos	9
2.2.1	Movimento Retilíneo Uniforme (MRU)	9
2.2.2	Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV)	10
2.2.3	Leis de Newton	12
2.2.4	Movimento Circular Uniforme (MCU)	15
2.2.5	Sistema de Partículas	20
2.2.6	Forças Internas de um Sistema de Partículas	23
3	Modelo Teórico do Propulsor	25
3.1	Oscilação da Carcaça do Propulsor	25
3.2	Obtenção do Deslocamento (Restrição por Catracas)	29
3.3	Quantificação do Deslocamento	31
4	Modelos Experimentais	38
4.1	Primeiro Modelo Experimental	38
4.1.1	Metodologia do Experimento	42
4.2	Segundo Modelo Experimental	44
4.2.1	Metodologia do Experimento	50
4.2.2	Cálculo do Deslocamento Teórico em Um Ciclo	51
5	Resultados, Conclusões e Perspectivas futuras	53
5.1	Resultados do Primeiro Experimento	53
5.2	Resultados do Segundo Experimento	53
5.3	Conclusões e Perspectivas Futuras	68
	Referências	71

Lista de Tabelas

4.1	Características Dimencionais e Materiais Utilizados no Primeiro Protótipo.	38
4.2	Características Dimencionais e Materiais Utilizados no Segundo Protótipo.	45
5.1	Resultados Experimentais para $\omega = 220rpm$.	54
5.2	Resultados Experimentais para $\omega = 290rpm$.	55
5.3	Resultados Experimentais para $\omega = 426rpm$.	55
5.4	Resultados Experimentais para $\omega = 580rpm$.	56
5.5	Resultados Experimentais para $\omega = 720rpm$.	56
5.6	Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{ta_n} para $\omega = 220rpm$.	63
5.7	Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{ta_n} para $\omega = 290rpm$.	63
5.8	Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{ta_n} para $\omega = 426rpm$.	64
5.9	Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{ta_n} para $\omega = 580rpm$.	64
5.10	Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{ta_n} para $\omega = 720rpm$.	65

Lista de Figuras

1.1	Esquema simplificado do processo de comprovação do deslocamento	4
2.1	Desenho esquemático do dispositivo de João Carlos Ferreira (FERREIRA, 1995).	6
2.2	Desenho esquemático do dispositivo de Bronislavovich (BRONISLAVOVICH, 1996).	6
2.3	Desenho esquemático do dispositivo de Wander Rodrigues Vieira (VIEIRA, 2000).	7
2.4	Desenho esquemático do dispositivo de Kolb e Munoz.	7
2.5	Sequências de fotos comprovando o deslocamento do protótipo na piscina (MARTINEZ, 2011).	8
2.6	Diagramas horários das posições e velocidade no MRU.	10
2.7	Diagrama horário da velocidade escalar no MRUV.	11
2.8	Diagrama horário das posições no MRUV.	12
2.9	Diagrama horário da aceleração no MRUV.	13
2.10	Diagramas de Forças	15
2.11	Movimento circular (NUSSENZVEIG, 2002).	15
2.12	Velocidade instantânea (NUSSENZVEIG, 2002).	17
2.13	Uma partícula movendo-se do ponto P_1 para P_2 com velocidade de intensidade constante em um círculo de raio r , (HALLIDAY, 2003) adaptado pelo autor.	18
2.14	Desenho esquemático de uma esfera em movimento de rotação entorno de um eixo	21
2.15	Centro de Massa de um Sistema de Partículas	22
3.1	Esquema simplificado do propulsor e seu sistema de referência.	25
3.2	Esquema do propulsor nos instantes t_0 e t_1	26
3.3	Representação ilustrativa do deslocamento da carcaça para cada instante t'	27
3.4	Esquema teórico do propulsor fixado sobre o carro e seu sistema de referência inercial com origem no θ dos eixos cartesianos x e y	30
3.5	Desenho esquemático do propulsor apresentando a oscilação da carcaça na direção do eixo x	31
3.6	Esquema teórico do propulsor fixado sobre o carro com restrições para os lados e para trás.	32
3.7	Desenho esquemático do efetivo deslocamento do propulsor na direção do eixo x com sentido positivo.	32
3.8	Desenho esquemático do efetivo deslocamento do propulsor na direção do eixo x com sentido positivo.	33
3.9	Desenho esquemático da esfera em contato com a superfície interna da carcaça.	34
3.10	Desenho esquemático da unidade móvel se deslocando linearmente.	35
4.1	Fonte ajustável de 1,2 a 15 volts	39
4.2	Sequências de fotos do primeiro protótipo.	40
4.3	Perspectiva das esferas em funcionamento.	40

4.4	Desenho esquemático apresentando 3 instantes diferentes das esfera, a cor verde representando o início do salto, preta no meio do salto, e a branca no final do salto.	41
4.5	Sequência de fotos da esfera durante o salto	41
4.6	Sequências de fotos do propulsor se deslocando no laboratório no sentido da seta (Caminho de ida e volta).	43
4.7	Foto do segundo protótipo.	44
4.8	Conjunto de 4 peças do propulsor.	45
4.9	Desenho da pista interna da carcaça	46
4.10	Esboço da montagem da carcaça com o rotor	47
4.11	Foto do motor utilizado no propulsor.	47
4.12	Detalhes do sistema de transmissão motor/rotor.	48
4.13	Detalhe da distribuição das três esteras no rotor.	48
4.14	Foto do cronômetro Azeheb.	49
4.15	Foto do tacômetro digital TC-5030.	49
4.16	Sequências de fotos do propulsor se deslocando no laboratório no sentido da seta.	52
4.17	Foto da bancada montada para os experimentos.	52
5.1	Gráfico Posição x Tempo prático (x x $< t >$) com velocidade angular de $220rpm$	57
5.2	Gráfico Posição x Tempo teórico (D_{t_n} x $< t >$) com velocidade angular de $220rpm$	57
5.3	Gráfico Posição x Tempo prático (x x $< t >$) com velocidade angular de $290rpm$	58
5.4	Gráfico Posição x Tempo teórico (D_{t_n} x $< t >$) com velocidade angular de $290rpm$	58
5.5	Gráfico Posição x Tempo prático (x x $< t >$) com velocidade angular de $426rpm$	59
5.6	Gráfico Posição x Tempo teórico (D_{t_n} x $< t >$) com velocidade angular de $426rpm$	59
5.7	Gráfico Posição x Tempo prático (x x $< t >$) com velocidade angular de $580rpm$	60
5.8	Gráfico Posição x Tempo teórico (D_{t_n} x $< t >$) com velocidade angular de $580rpm$	61
5.9	Gráfico Posição x Tempo prático (x x $< t >$) com velocidade angular de $720rpm$	61
5.10	Gráfico Posição x Tempo teórico (D_{t_n} x $< t >$) com velocidade angular de $720rpm$	62
5.11	Gráfico Deslocamentos Real (x) definido durante os experimentos x Deslocamento Esperado (D_{ta_n}) definido utilizando-se o modelo matemático, com velocidade angular de $290rpm$	65
5.12	Gráfico Deslocamentos Real (x) definido durante os experimentos x Deslocamento Esperado (D_{ta_n}) definido utilizando-se o modelo matemático, com velocidade angular de $426rpm$	66
5.13	Gráfico Deslocamentos Real (x) definido durante os experimentos x Deslocamento Esperado (D_{ta_n}) definido utilizando-se o modelo matemático, com velocidade angular de $580rpm$	66

-
- 5.14 Gráfico Deslocamentos Real (x) definido durante os experimentos x Deslocamento Esperado ($D_{t_{a_n}}$) definido utilizando-se o modelo matemático, com velocidade angular de $720rpm$ 67
- 5.15 Esboço do gráfico Velocidade do Propulsor x Posição em Graus de Seu Rotor. 68

Introdução

Desde seus primórdios o homem debruça sobre a necessidade por mobilidade. Sendo ela mais evidenciada após a invenção da roda, desde então o apelo do homem por propulsores mais apropriados vem evoluindo constantemente, da tração animal, da máquina a vapor, dos motores a combustão interna, até os dias de hoje. O objetivo primordial dos propulsores é viabilizar o deslocamento do dispositivo por meio de rodas, hélices, turbinas ou outro tipo qualquer de interação com o meio externo.

O meio em que a unidade móvel encontra-se imersa é um fator primordial para a escolha do tipo do propulsor e seu dispositivo de interação com o meio. O atrito, que é responsável pela viabilização do movimento, tem que ser adequadamente explorado pelo dispositivo de interação, cabendo a este converter a potência fornecida pelo propulsor em deslocamento linear da respectiva unidade móvel.

Dentro da concepção da mobilidade, nesta dissertação vamos explorar uma nova forma de se viabilizar o processo de propulsão de uma unidade móvel específica, como veremos a seguir.

Os dispositivos convencionais de interação com o meio, atualmente existentes como hélices, rodas entre outros, quando submetido a ambiente altamente agressivos, podem não ser os mais adequados, podendo impor restrições nos projetos de unidades móveis subaquáticas para ambientes altamente agressivos. Neste tipo de projeto, seria mais apropriado projetar uma unidade móvel com carcaça totalmente selada, sem nenhum ou quase nenhum ponto de descontinuidade na carcaça externa, o que com certeza leva a pontos de fragilização estrutural da carcaça.

O problema é que, com exceção do propulsor magnetohidrodinâmico, que possui a limitação de só poder operar com gases ionizados ou fluidos condutores de energia elétrica (AOKI, 2011), todos ou quase todos os modelos de propulsores viáveis até hoje desenvolvidos necessitam utilizar um desses dispositivos de interação com o meio, neste caso não sendo possível a viabilização do projeto de uma unidade móvel subaquática com carcaça totalmente selada.

Para que se possa viabilizar o desenvolvimento de um projeto de uma unidade móvel subaquática totalmente selada, não se pode utilizar nenhum dos dispositivos de interação com o meio, acima mencionados, e por consequência nenhum dos propulsores já desenvolvidos. Partindo desta observação, abre-se uma oportunidade para o desenvolvimento

de uma nova tecnologia de propulsor, que possa ser colocado no interior de uma unidade móvel subaquática com a carcaça totalmente selada, e a desloque satisfatoriamente, como os propulsores convencionais atualmente os fazem.

Verificamos que através do atrito e da manipulação adequada das forças geradas pelo desbalanceamento de massas rotativas, pode-se obter uma força resultante capaz de deslocar uma unidade móvel. Por se tratar de forças centrífugas, a obtenção do deslocamento não necessita dos dispositivos convencionais de interação com o meio, necessitando apenas de um ponto de atrito externo. Tal ponto de atrito pode ser obtido por meio de uma deformação proposital na carcaça da unidade móvel, tendo como objetivo restringir o grau de liberdade do mesmo em uma determinada direção. Logo, o objetivo desta dissertação é demonstrar, em laboratório, o deslocamento de uma unidade móvel com rodas, através do desenvolvimento de um propulsor por desbalanceamento de massas rotativas a ele acoplado.

A comprovação do deslocamento e os resultados obtidos no desenvolvimento do projeto da pesquisa é de importância, pois servirá de subsídio para futuros projetos de um propulsor por desbalanceamento de massas rotativas, capaz de ser implantado e utilizado em submersíveis a serem usados em meios ambientes altamente agressivos.

A motivação para o desenvolvimento do respectivo projeto, não reside somente na possibilidade de viabilizar um propulsor mais adequado para o mercado, mas também na vertente que tange o desafio de desenvolver algo inovador. Assim, nossa maior motivação foi a ideia de elaborar uma nova tecnologia e a oportunidade de poder contribuir para o desenvolvimento tecnológico.

Este trabalho se restringiu em evidenciar o funcionamento de um protótipo de propulsor por desbalanceamento de massas rotativas, a partir da comprovação do deslocamento de uma unidade móvel com rodas propelida pelo respectivo propulsor, não cabendo no âmbito do desenvolvimento deste trabalho, a preocupação com estudos de desempenho técnico, análise de viabilidade técnica e econômica, nem tão pouco otimizações. Todos os esforços foram direcionados em viabilizar e comprovar o efetivo funcionamento do propulsor em laboratório.

Como limitação para este projeto, primeiramente, em função do curto prazo de tempo disponibilizado para este tipo de pesquisa e da necessidade de se ter que elaborar um protótipo funcional no âmbito deste trabalho, houve uma limitação na quantidade de protótipos desenvolvidos.

Também, por se tratar do desenvolvimento de uma nova tecnologia as informações foram limitadas e as proposições não eram comprovadas. Toda a pesquisa orbitou em torno de

dados empíricos recolhidos de um protótipo rústico primário, e de dados teóricos levantados durante a fundamentação da teoria do modelo proposto, os quais subsidiaram a elaboração e desenvolvimento de um segundo e último protótipo funcional.

Com o intuito de agilizar a confirmação e o levantamento de alguns parâmetros, optamos em elaborar um protótipo primário, com limitações técnicas, a partir do processo de fabricação artesanal, por ser mais rápido de se realizar.

Durante a elaboração e projeto do segundo protótipo do propulsor, inserimos um parâmetro a mais do que no protótipo primário, o que provavelmente levou ao não funcionamento adequado do dispositivo no laboratório. Sendo o tempo restante insuficiente para a elaboração de um novo dispositivo, optou-se por alterar, não o objetivo da pesquisa, mas o tipo de tecnologia de propulsor proposto. Desta forma pode-se aproveitar o dispositivo já elaborado e dar prosseguimento a pesquisa sem comprometer o objetivo principal.

Assim organizamos dois modelos de tecnologia de propulsores por desbalanceamento de massas rotativas, a primeira tecnologia é a que considera o sistema desbalanceado intencionalmente em uma determinada direção, e a segunda é a que considera o sistema sempre desbalanceado. Com relação a segunda tecnologia, realizamos uma pesquisa de anterioridade onde comentamos e discutimos dispositivos de propulsores com funcionamento similar ou com alguma característica relevante.

A confirmação do deslocamento foi feita a partir da comprovação da variação da posição do centro de massa do dispositivo ao longo do tempo em relação a um referencial inercial dentro do laboratório, conforme ilustrado na figura 1.1.

Desta forma, no capítulo 2 fazemos a revisão da literatura e a fundamentação teórica necessária ao entendimento do fenômeno físico associado ao funcionamento do propulsor. No capítulo 3 propomos um modelo teórico para o propulsor. Já no capítulo 4 temos os resultados, conclusões e perspectivas futuras.

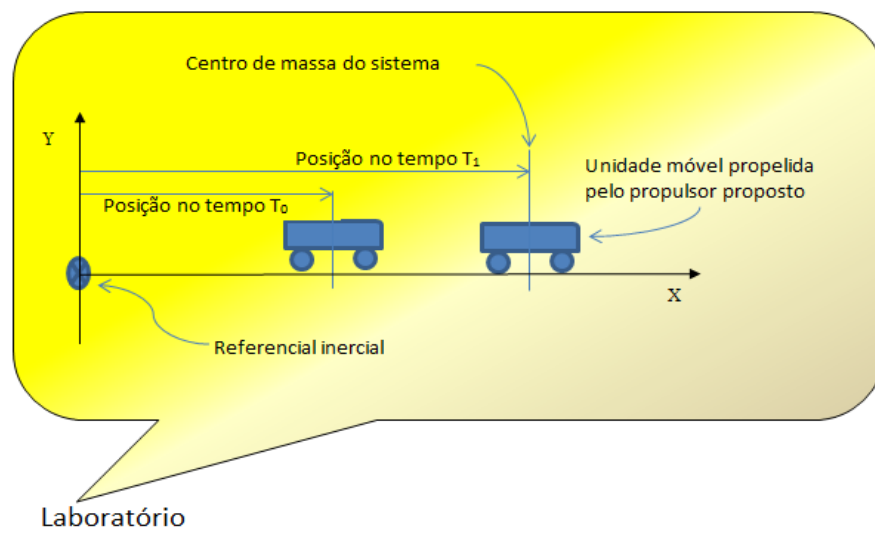


Figura 1.1: Esquema simplificado do processo de comprovação do deslocamento

Fundamentação Teórica

2.1 *Revisão da Literatura*

Neste capítulo são apresentados e comentados alguns documentos de patentes, tese de doutorado, dissertações de mestrados, e uma breve revisão em conceitos teóricos ligados ao tema da dissertação, que agregaram valor no desenvolvimento da mesma.

Em 09 de janeiro de 1969 Matyas depositava sua patente com o título de Aparelho Propulsor. Tratava-se, basicamente, de colocar várias massas em uma armação na forma de guarda-chuva, sendo uma massa em cada haste. Quando postas em rotação em torno de um eixo comum, atingiam um determinado setor da circunferência, onde por meio de um dispositivo mecânico, as massas eram impelidas para um raio menor que o da massa do setor oposto, o que provoca uma diferença de forças gas, já que a intensidade destas forças variam com o raio, e conseqüentemente promovia uma oscilação na carcaça do aparelho (MATYAS, 1969). A desvantagem deste dispositivo é que a força resultante é consequência da diferença entre as duas forças oposta, diferentemente do que foi proposto para esta dissertação, onde a força resultante é a própria força gerada no processo.

Em 1995, encontramos um dispositivo denominado Gerador de Empuxo por Centrifugação, inventado por João Carlos Ferreira, tratava-se de um dispositivo com componentes rotativos distribuídos em torno de um eixo comum. Os dispositivos rotativos ao passar por um determinado setor da circunferência, por meio de um sistema mecânico entra em rotação, gerando um desequilíbrio de forças em relação ao dispositivo rotativo do lado oposto, que não encontra-se em rotação. Embora obtenha-se uma força resultante, esta é muito pequena em relação a massa do conjunto como um todo. Podemos encontrar este tipo de dispositivo em parques de diversões, porém não com o intuito de gerar movimento linear em uma determinada direção, mas para rodar cadeiras em forma de xícaras gigantes em torno de um eixo comum, como carrocel. Na figura 2.1 temos um esboço do dispositivo inventado por João Carlos Ferreira (FERREIRA, 1995).

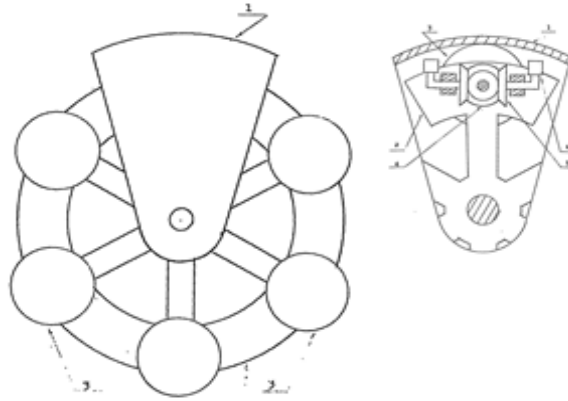


Figura 2.1: Desenho esquemático do dispositivo de João Carlos Ferreira ([FERREIRA, 1995](#)).

Em em 1996 Jury Bronislavovich, com o mesmo princípio de funcionamento de Matyas, apresentava seu invento, no qual a força resultante será obtida por meio da variação do raio ([BRONISLAVOVICH, 1996](#)), como pode ser visto na figura 2.2.

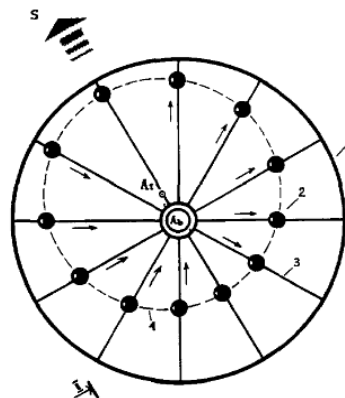


Figura 2.2: Desenho esquemático do dispositivo de Bronislavovich ([BRONISLAVOVICH, 1996](#)).

Em 2000 Wander Rodrigues Vieira apresenta seu invento com o título de Propulsor Centrífugo, gerador de movimentos Independentes Para veículos Aéreo Espacial. Trata-se, basicamente, de um sistema de 4 massas rotativas em torno de um eixo comum, as quais podem em um determinado ponto variar o tamanho de seu raio, ou seja, é um processo similar ao de Matyas e ao de Jury Bronislavovich. Na figura 2.3 temos um esboço de seu dispositivo ([VIEIRA, 2000](#)).

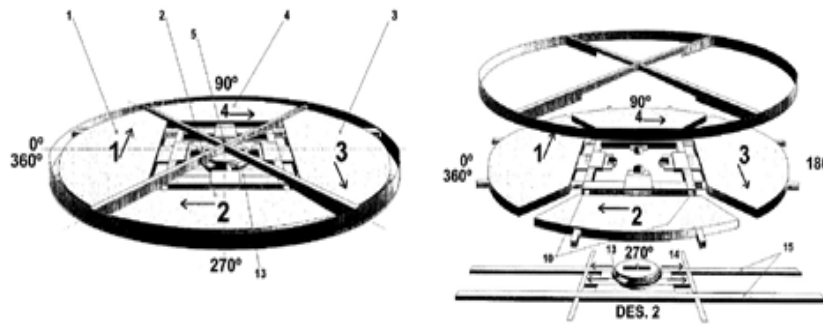


Figura 2.3: Desenho esquemático do dispositivo de Wander Rodrigues Vieira (VIEIRA, 2000).

Em em 1998, encontramos uma outra patente de um dispositivo também capaz de transformar um movimento circular em um movimento unidirecional, porém a obtenção de sua força resultante difere das demais citadas nesta sessão. Na figura 2.4 temos um desenho esquemático deste dispositivo, onde podemos observar um disco com uma massa localizada em sua extremidade. Quando animado com uma velocidade angular, esta massa gera um desbalanceamento no disco, o qual encontra-se acoplado na extremidade de um pêndulo, que devido a força gerada pela massa excêntrica no disco, faz o pêndulo oscilar para frente e para trás, porém para um dos sentidos o sistema possui um batente, impedindo que o pêndulo, por meio de um choque, siga sua trajetória normalmente, proporcionando assim um deslocamento de todo o conjunto em uma única direção (KOLB, 1998).

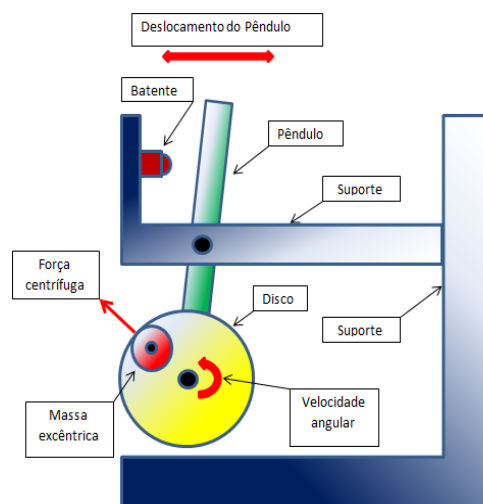


Figura 2.4: Desenho esquemático do dispositivo de Kolb e Munoz.

Em 2009 encontramos um artigo com o título de Naval Propulsion System Based on a Rotary Movimento, no qual encontramos grandes similitudes com a nossa pesquisa, seu sistema de propulsão baseá-se em desbalanceamento de massas rotativas, e é aplicado em

uma unidade móvel aquática ([LLANA; VILA; ARGUINCHONA, 2009](#)).

Em 2011, encontramos um tese de doutorado apresentada por Ignacio de La liana Martínez com o título de Novo Sistema de Propulsão Naval. A tese está baseada na patente de Kolb e Munoz, ou seja, o sistema de propulsão utilizado na pesquisa é o da figura 2.4. A tese aborda a aplicação desta tecnologia para propeler um protótipo de navio em uma piscina, obtendo êxito como podemos ver nas fotos da figura 2.5. A importância desta tese para a nossa pesquisa reside na semelhança entre as duas, que são:

- Ambas utilizam propulsão obtida por desbalanceamento de massas rotativas;
- As aplicabilidades são focadas em unidades móveis para meios aquáticos.

Sendo assim, uma ótima fonte de consulta, estudo e comparação para o desenvolvimento desta dissertação ([MARTÍNEZ, 2011](#)).

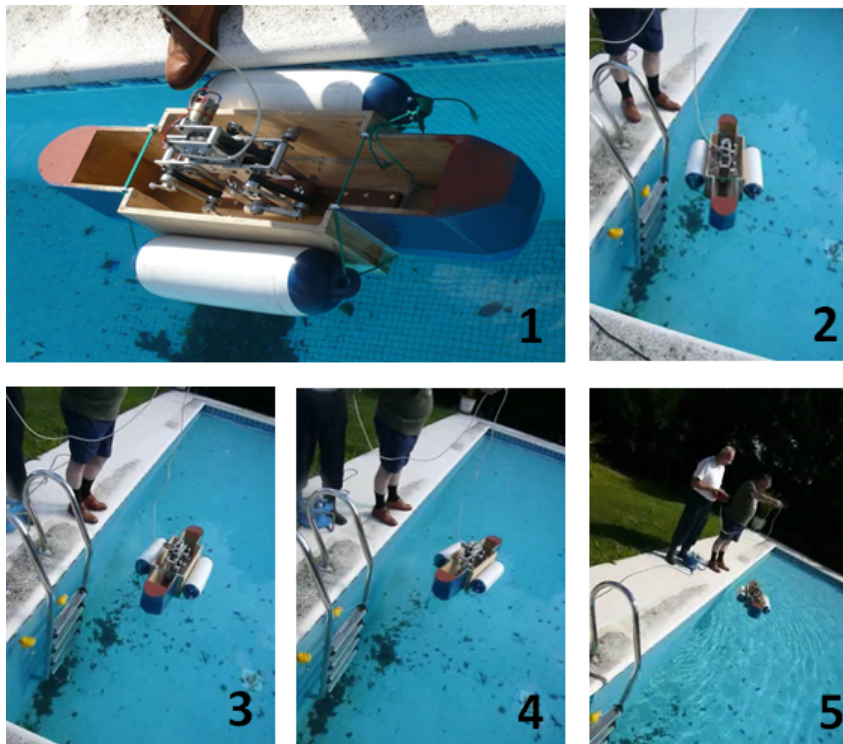


Figura 2.5: Sequências de fotos comprovando o deslocamento do protótipo na piscina ([MARTÍNEZ, 2011](#)).

2.2 Conceitos Teóricos

Nesta sessão faremos uma breve revisão em alguns conceitos físicos que permeiam o funcionamento do propulsor por desbalanceamento de massas rotativas.

2.2.1 Movimento Retilíneo Uniforme (MRU)

O movimento mais simples que existe é o movimento uniforme. Este movimento se caracteriza pelo fato de que percursos iguais são descritos em intervalos de tempos iguais (NUSSENZVEIG, 2002).

Para que no movimento retilíneo uniforme (MRU) a velocidade seja constante ao longo do tempo é necessário que a aceleração seja constante e nula.

A velocidade escalar média v_m pode ser expressa por:

$$v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x - x_0}{t - t_0} \quad (2.1)$$

Se considerarmos o $\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$, então podemos definir a sua velocidade escalar instantânea como sendo:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (2.2)$$

ou seja,

$$v = \frac{dx}{dt} = \text{constante} \quad (2.3)$$

logo

$$dx = v dt. \quad (2.4)$$

Integrando ambos os lados temos,

$$\int_{x_0}^x dx = \int_{t_0}^t v dt \quad (2.5)$$

o que nos dá,

$$x - x_0 = v(t - t_0) \quad (2.6)$$

Considerando $t_0=0$ e substituindo na equação, obtemos a função horária das posições do

MRU, conforme descrita abaixo:

$$x = x_0 + vt \quad (2.7)$$

Onde, no SI, as posições final x e inicial x_0 são dadas em metros (m), a velocidade em um instante qualquer v é dada em (m/s) e o tempo t em segundos (s).

Na figura 2.6, são apresentados os diagramas horários das posições e da velocidade no MRU.

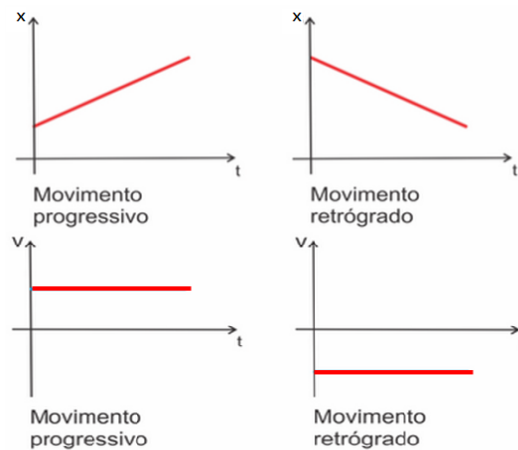


Figura 2.6: Diagramas horários das posições e velocidade no MRU.

2.2.2 Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV)

Este movimento se caracteriza por se desenvolver em uma única dimensão com direção retilínea e velocidade variável, de forma constante ao longo do tempo, ou seja, a aceleração tem que ser constante (NUSSENZVEIG, 2002).

Com a mesma linha de raciocínio da sessão anterior, podemos representar a aceleração escalar média (a_m) conforme abaixo:

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t - t_0}. \quad (2.8)$$

No $\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$, então podemos definir a aceleração instantânea a como,

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (2.9)$$

ou

$$a = \frac{dv}{dt}. \quad (2.10)$$

Se $a = \text{constante}$, então:

$$dv = a dt, \quad (2.11)$$

integrando-se a equação temos,

$$\int_{v_0}^v dv = \int_{t_0}^t a dt \quad (2.12)$$

temos,

$$v - v_0 = a(t - t_0) \quad (2.13)$$

Considerando $t_0=0$ e substituindo na equação obtemos a função horária da velocidade escalar do MRUV, conforme descrita abaixo:

$$v = v_0 + at \quad (2.14)$$

Onde:

- Velocidade final v e a velocidade inicial v_0 são dadas em (m/s);
- Tempo t em segundos (s);
- Aceleração a em (m/s^2).

Por se tratar de uma equação do primeiro grau, a sua representação gráfica será uma reta, como pode ser visto na figura 2.7.

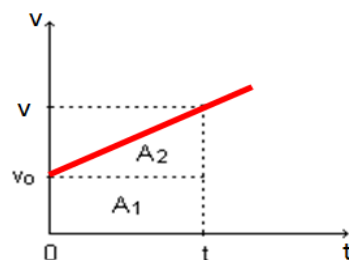


Figura 2.7: Diagrama horário da velocidade escalar no MRUV.

Substituindo a equação 2.14 na equação 2.3 temos:

$$\frac{dx}{dt} = v_0 + at \quad (2.15)$$

Integrando a equação obtemos:

$$\int_{x_0}^x dx = \int_{t_0}^t (v_0 + at) dt. \quad (2.16)$$

Portanto temos:

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad (2.17)$$

isto é,

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (2.18)$$

Observe que agora temos uma equação do segundo grau, e sua representação gráfica será uma parábola, conforme representado na figura 2.8.

Na figura 2.9 temos a representação gráfica da função horária da aceleração escalar no MRUV.

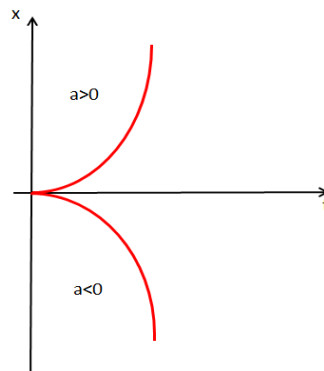


Figura 2.8: Diagrama horário das posições no MRUV.

2.2.3 Leis de Newton

Newton em 1687 apresentou em seu trabalho, "Philosophiae Naturales Principia Mathematica", as três leis do movimento, formando a base de nosso entendimento sobre o movimento e suas causas. Embora descobertas no século XX, na física-química e na relatividade especial, revelaram limitações em suas formulações (NUSSENZVEIG, 2002). Entretanto, estas limitações não influenciam na pesquisa.

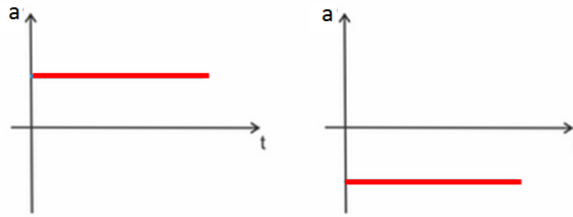


Figura 2.9: Diagrama horário da aceleração no MRUV.

A Primeira lei de Newton ou Princípio da Inércia, diz que se sobre um corpo não atua nenhuma força resultante, o mesmo tende a permanecer em repouso se estiver em repouso, e em movimento retilíneo uniforme se estiver em movimento. A tendência de um corpo a permanecer em repouso ou em movimento retilíneo uniforme é denominado Inércia e os sistemas de referências, aos quais são aplicados, são denominados sistemas inerciais (NUSSENZVEIG, 2002).

Para um sistema com massa constante em um referencial inercial, temos (NUSSENZVEIG, 2002):

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}, \quad (2.19)$$

onde:

- $\sum \vec{F}$ representa a soma vetorial de todas as forças que atuam sobre o sistema, também denominada força resultante;
- m é a massa do sistema;
- \vec{a} a sua aceleração.

Por se tratar de uma soma vetorial pode-se escrever a equação 2.19 em relação as suas componentes nos eixos x , y e z , obtendo-se a equação 2.20 .

$$\sum F_x + \sum F_y + \sum F_z = \sum \vec{F} \quad (2.20)$$

Sendo:

- $\sum F_x$ a força resultante na direção x ;
- $\sum F_y$ a força resultante na direção y ;
- $\sum F_z$ a força resultante na direção z .

A soma das três forças resultantes representam a soma de todas as forças que atuam sobre o sistema, ou seja a força resultante no sistema $\sum \vec{F}$ (NUSSENZVEIG, 2002).

Pode-se escrever ainda :

$$\begin{aligned}\sum F_x &= ma_x \\ \sum F_y &= ma_y \\ \sum F_z &= ma_z\end{aligned}\tag{2.21}$$

Onde:

- a_x representa a componente da aceleração no eixo x ;
- a_y no eixo y ;
- a_z no eixo z .

Na seção 2.2, na qual é apresentado o conceito da quantidade de movimento linear, é discutido a segunda lei de Newton para quando a massa do sistema não permanece constante ao longo do tempo.

A terceira lei de Newton diz que a cada ação cabe uma reação de igual intensidade na mesma direção em sentido oposto, podendo ser descrita conforme a equação 2.22 e ilustrada na figura 2.10 (LEMOS, 2007).

$$\vec{F}_{ab} = -\vec{F}_{ba}\tag{2.22}$$

Onde \vec{F}_{ab} é a força que b exerce em a e \vec{F}_{ba} é a força que a exerce em b .

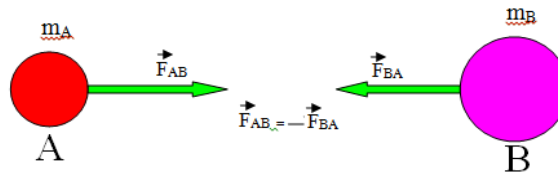


Figura 2.10: Diagramas de Forças

2.2.4 Movimento Circular Uniforme (MCU)

O movimento circular uniforme se caracteriza por descrever uma trajetória circular com módulo de velocidade instantânea constante, ou seja, a partícula descreve arcos de círculo iguais em tempos iguais.

Na figura 2.11 temos r representando o raio da trajetória circular, P a partícula, o ângulo θ formado entre vetor deslocamento $\mathbf{r} = \mathbf{OP}$ e o eixo Ox do sistema cartesiano com origem no centro do círculo, corresponde a posição instantânea da partícula, e é positivo no sentido anti-horário. O arco S correspondente ao ângulo θ sobre o círculo é dado por (NUSSENZVEIG, 2002):

$$S = r\theta \tag{2.23}$$

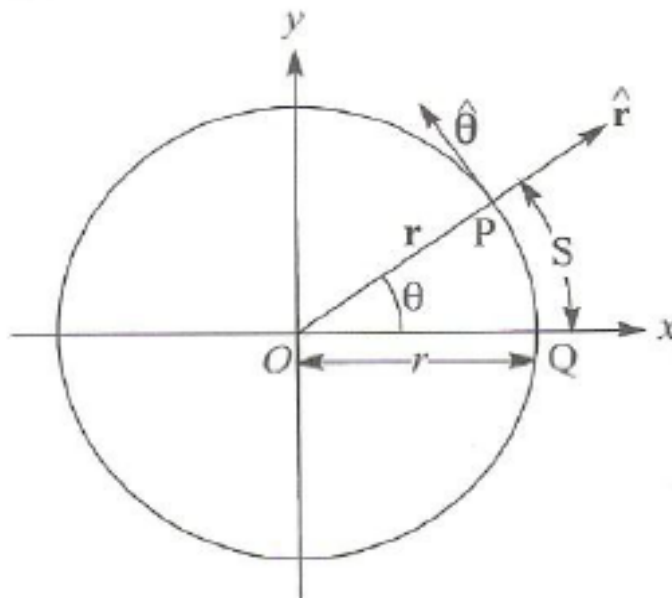


Figura 2.11: Movimento circular (NUSSENZVEIG, 2002).

Ainda na figura temos $\hat{\mathbf{r}}$ que representa o vetor unitário na direção de \mathbf{r} , que aponta radialmente para fora, e $\hat{\boldsymbol{\theta}}$, como sendo o vetor unitário tangente ao círculo em P , orientado no sentido positivo. Observe que ambos os vetores variam com a posição da partícula P ocupada ao longo do círculo.

Pela definição de movimento circular uniforme, a lei horária é dada por:

$$S = S_0 + v(t - t_0) \quad (2.24)$$

onde:

- S_0 representa o valor do arco no instante inicial t_0 ;
- v representa a velocidade linear com que o arco S é descrito.

Como $|\Delta \mathbf{r}|$ se confundi com $|\Delta S|$ quando consideramos $\Delta t \implies 0$, logo $|v|$ dá o módulo da velocidade instantânea $\mathbf{v}(t)$, como pode ser visto na figura 2.12, e é dado por:

$$\mathbf{v} = v\hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (2.25)$$

Temos ainda:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (2.26)$$

Tratando-se de uma circunferência o deslocamento executado por uma partícula em uma volta completa corresponde a $2\pi r$, sendo assim, o tempo necessário para se executar uma volta completa, denominado como sendo o Período T , pode ser expresso por (NUSSENZ-VEIG, 2002):

$$T = \frac{2\pi r}{|v|}. \quad (2.27)$$

Chama-se Frequência f o inverso do período:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.28)$$

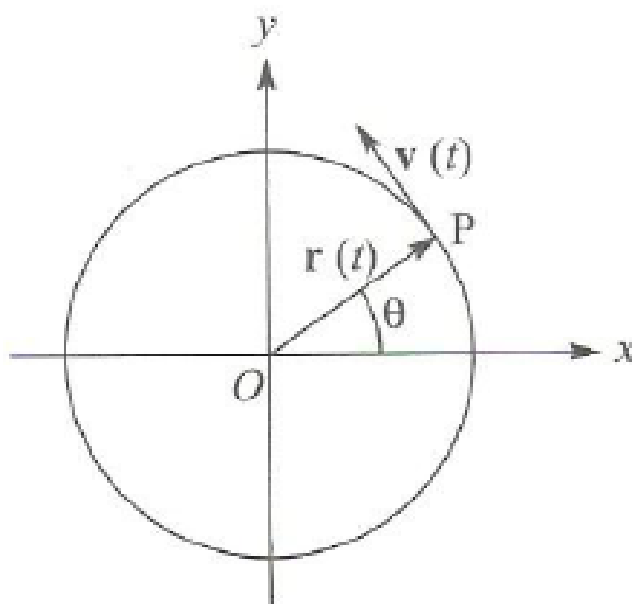


Figura 2.12: Velocidade instantânea (NUSSENZVEIG, 2002).

Vamos empregar a equação 2.23 para exprimir a lei horária 2.24 em função de θ logo,

$$r\theta = r\theta_0 + v(t - t_0)$$

$$\frac{r\theta}{r} = \frac{r\theta_0}{r} + \frac{v(t - t_0)}{r}$$

$$\theta = \theta_0 + \omega(t - t_0) \quad (2.29)$$

Sendo

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2.30)$$

Aonde ω representa a velocidade angular com que gira o corpo em torno do eixo central.

No movimento circular uniforme o módulo da velocidade permanece constante, porém a sua direção e sentido estão em constante alteração a medida que a partícula altera sua posição. Para que isso ocorra é necessário que a partícula esteja acelerada, mesmo que esta não altere a intensidade da velocidade, tem que existir uma aceleração para alterar a direção da velocidade (HALLIDAY, 2003).

Para determinarmos esta aceleração vamos observar a figura 2.13, onde temos uma partícula movendo-se em um círculo de raio r , sendo o sistema de coordenadas adotado no centro do círculo. Os pontos P_1 e P_2 estão localizados de forma simétrica em relação ao eixo y , e $|v_1| = |v_2| = |v|$ dão os módulos das velocidades instantâneas, e são tangentes ao círculo

em p_1 e p_2 .

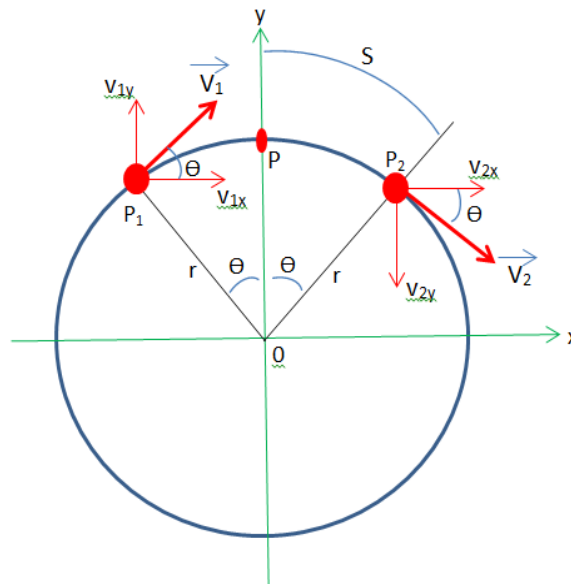


Figura 2.13: Uma partícula movendo-se do ponto P_1 para P_2 com velocidade de intensidade constante em um círculo de raio r , (HALLIDAY, 2003) adaptado pelo autor.

As componentes das velocidades \vec{v}_1 e \vec{v}_2 representados na figura 2.13 são:

- $v_{1x} = v \cos \theta$;
- $v_{1y} = v \sin \theta$;
- $v_{2x} = v \cos \theta$;
- $v_{2y} = -v \sin \theta$;
- v representa a intensidade de \vec{v}_1 e \vec{v}_2 .

Como a partícula percorre a distância de $2r\theta$ em um intervalo de tempo Δt temos,

$$v = \frac{2r\theta}{\Delta t}, \tag{2.31}$$

logo,

$$\Delta t = \frac{2r\theta}{v}. \tag{2.32}$$

Sendo a aceleração vetorial média dada por:

$$\vec{a}_m = \frac{\vec{\Delta v}}{\Delta t}, \quad (2.33)$$

então a sua componente a_{mx} no eixo x pode ser expressa por:

$$a_{mx} = \frac{v_{2x} - v_{1x}}{\Delta t}, \quad (2.34)$$

substituindo-se temos,

$$a_{mx} = \frac{v \cos \theta - v \cos \theta}{\Delta t} = 0. \quad (2.35)$$

Analogamente a componente a_{my} no eixo y é dado por:

$$a_{my} = \frac{v_{2y} - v_{1y}}{\Delta t}, \quad (2.36)$$

então,

$$\begin{aligned} a_{my} &= \frac{-v \sin \theta - v \sin \theta}{\Delta t} \\ a_{my} &= \frac{-2v \sin \theta}{\frac{2r\theta}{v}} \\ a_{my} &= -\left(\frac{v^2}{r}\right)\left(\frac{\sin \theta}{\theta}\right). \end{aligned} \quad (2.37)$$

A partir deste resultado podemos avaliar a aceleração instantânea, considerando o limite deste intervalo de tempo tendendo a zero; analogamente podemos fazer o ângulo θ tender a zero, de tal modo que P_1 e P_2 tendam a P , então,

$$\begin{aligned} a_y &= \lim_{\theta \rightarrow 0} \left(-\left(\frac{v^2}{r}\right)\left(\frac{\sin \theta}{\theta}\right)\right) \\ a_y &= -\left(\frac{v^2}{r}\right) \lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{\sin \theta}{\theta}\right), \end{aligned} \quad (2.38)$$

Considerando-se que para pequenos ângulos, $\sin \theta \approx \theta$, e pelo teorema do limite trigonométrico fundamental o $\lim_{\theta \rightarrow 0} \left(\frac{\sin \theta}{\theta}\right)$ tende para o valor 1, logo a componente a_y da aceleração instantânea em P pode ser descrita como:

$$a_y = -\left(\frac{v^2}{r}\right). \quad (2.39)$$

O sinal negativo da equação 2.39 indica que no ponto P a aceleração aponta para o centro da circunferência, sendo o ponto P um ponto qualquer do círculo, pode-se dizer que este resultado pode ser aplicado a qualquer partícula que se mova em um círculo com módulo

da velocidade constante (HALLIDAY, 2003).

Como a aceleração centrípeta \vec{a}_c sempre aponta para o centro da circunferência com sua direção no raio da mesma, pode-se escrever (HALLIDAY, 2003),

$$|\vec{a}_c| = \frac{v^2}{r}. \quad (2.40)$$

No movimento circular uniforme a força centrípeta \vec{f}_c aponta para o centro da circunferência na mesma direção da \vec{a}_c , logo a sua intensidade pode ser dada por (NUSSENZVEIG, 2002):

$$|\vec{f}_c| = \frac{mv^2}{r}, \quad (2.41)$$

ou

$$|\vec{f}_c| = m\omega^2 r, \quad (2.42)$$

onde a velocidade angular ω é dada em radianos por segundos (*Rad/s*), e a intensidade da força é dado em newton (N) (NUSSENZVEIG, 2002).

Defini-se como sendo sistema de referência inercial, o conjunto de sistemas de referência nos quais um corpo não irá acelerar ($\vec{a} = 0$) se não existirem na sua vizinhança corpos que produzam forças ($\vec{F} = 0$) (HALLIDAY, 2003).

Defini-se como sendo sistema de referência não-inercial, o sistema de referência posicionado em um corpo que está acelerando (HALLIDAY, 2003).

A força centrífuga, pseudoforça centrífuga ou ainda força fictícia F_c , recebe esta denominação por não se tratar de uma força na definição do termo, ela apenas pode ser percebida por um observador solidário a um referencial não inercial em movimento de rotação em relação a um referencial inercial, por exemplo, se uma pessoa estiver sentado no banco de um carro realizando uma curva para a esquerda, ela deve atribuir o seu deslizamento a uma pseudoforça que o puxa para a direita, este tipo de força é chamado de força centrífuga, como pode ser visto na figura 2.14.

2.2.5 Sistema de Partículas

Considera-se partículas como sendo corpos com dimensões desprezíveis (HEWITT, 2011).

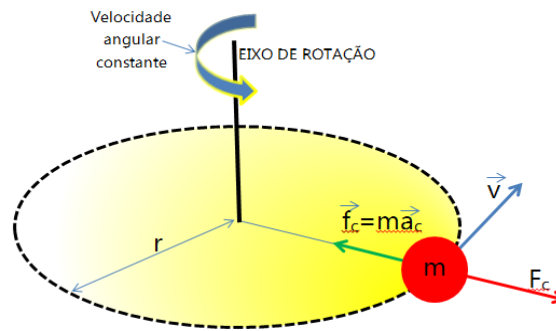


Figura 2.14: Desenho esquemático de uma esfera em movimento de rotação entorno de um eixo

O centro de massa de um sistema, é a posição média de toda a massa que constitui este sistema (HEWITT, 2011).

A posição do centro de massa de um sistema de n partículas, é definido pelo vetor posição $r_{cm}^{\vec{}}$ como (NUSSENZVEIG, 2002):

$$r_{cm}^{\vec{}} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + \dots + m_n \vec{r}_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (2.43)$$

onde m_1, m_2, \dots, m_n são respectivamente massas das partículas 1, 2, ..., n , sendo seus vetores posições representados por \vec{r}_1, \vec{r}_2 e \vec{r}_n conforme figura 2.15.

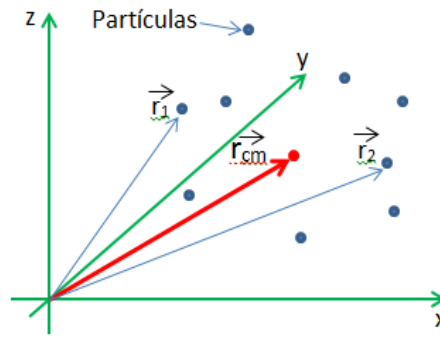


Figura 2.15: Centro de Massa de um Sistema de Partículas

A equação 2.43 pode ainda ser escrita resumidamente conforme a equação 2.44 (NUSSENZ-VEIG, 2002).

$$\vec{r}_{cm} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i \quad (2.44)$$

onde $M = \sum_{i=1}^n m_i$ é a soma das massas de todas as n partículas.

Derivando a equação 2.44 temos a velocidade do centro de massa \vec{v}_{cm} , logo:

$$\begin{aligned} \vec{v}_{cm} &= \frac{d\vec{r}_{cm}}{dt} \\ \vec{v}_{cm} &= \frac{1}{M} \left(m_1 \frac{d\vec{r}_1}{dt} + m_2 \frac{d\vec{r}_2}{dt} + \dots m_n \frac{d\vec{r}_n}{dt} \right) \\ \vec{v}_{cm} &= \frac{1}{M} (m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots m_n \vec{v}_n) \\ \vec{v}_{cm} &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i \end{aligned} \quad (2.45)$$

Diferenciando novamente temos a aceleração do centro de massa \vec{a}_{cm} , logo:

$$\begin{aligned} \vec{a}_{cm} &= \frac{d\vec{v}_{cm}}{dt} \\ \vec{a}_{cm} &= \frac{1}{M} \left(m_1 \frac{d\vec{v}_1}{dt} + m_2 \frac{d\vec{v}_2}{dt} + \dots m_n \frac{d\vec{v}_n}{dt} \right) \\ \vec{a}_{cm} &= \frac{1}{M} (m_1 \vec{a}_1 + m_2 \vec{a}_2 + \dots m_n \vec{a}_n) \\ \vec{a}_{cm} &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \vec{a}_i \end{aligned} \quad (2.46)$$

A quantidade de movimento linear de um sistema, pode ser descrito como sendo o produto de sua massa pela sua velocidade, como exposto na equação 2.47 .

$$\vec{P} = M\vec{v}_{cm} \quad (2.47)$$

Onde \vec{P} representa a quantidade de movimento.

Sabendo-se que a taxa de variação em relação ao tempo da quantidade de movimento de um sistema ($d\vec{P}/dt$) é igual à força resultante, ou seja,

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}. \quad (2.48)$$

Pela conservação da quantidade de movimento, se nenhuma força externa resultante atua sobre o sistema, a quantidade de movimento linear total do sistema permanece inalterada (HALLIDAY, 2003), ou seja:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{P}}{dt} &= 0 \\ \vec{P}_I &= \vec{P}_F \end{aligned} \quad (2.49)$$

onde:

- \vec{P}_I representa a quantidade de movimento inicial do sistema;
- \vec{P}_F representa a quantidade de movimento final do sistema.

2.2.6 Forças Internas de um Sistema de Partículas

As forças que atuam sobre um sistema de n partículas podem ser decompostas em forças internas e forças externas, e o somatório de todas estas forças representam a força resultante deste sistema, assim podemos escrever a equação do movimento, ou seja, para a i -ésima partícula (LEMOS, 2007).

$$\frac{d\vec{p}_i}{dt} = \sum_{i=1, j \neq i}^n \vec{F}_{ij} + \vec{F}_i^e \quad (2.50)$$

onde:

- \vec{p}_i é o momento linear da i -ésima partícula;
- \vec{F}_{ij} é a força interna que a partícula j exerce sobre a i -ésima partícula;
- \vec{F}_i^e representa a força externa sobre a i -ésima partícula;
- $j \neq i$ implica em dizer que uma determinada partícula não interage com ela mesma.

Logo, somando todas as partículas pode-se escrever a equação 2.51.

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{d\vec{p}_i}{dt} = \sum_{i=1, i \neq j}^n \vec{F}_{ij} + \sum_{i=1, i \neq j}^n \vec{F}_i^e \quad (2.51)$$

No apêndice A do livro de mecânica analítica de Nivaldo A. Lemos encontramos a equação A.9, apresentada aqui na equação 2.52 (LEMOS, 2007).

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n \vec{F}_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{i=1, i \neq j}^n \vec{F}_{ij} + \vec{F}_i^e = 0 \quad (2.52)$$

Substituindo-se a equação 2.52 na equação 2.51 obtém-se a equação 2.53 .

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{d\vec{p}_i}{dt} = \sum_{i=1, i \neq j}^n \vec{F}_i^e \quad (2.53)$$

Logo, se não houver forças externas resultantes atuando sobre um determinado sistema, este não irá alterar a posição de seu centro de massa, ou seja, forças puramente internas não são capazes de produzir movimentos (LEMOS, 2007).

Modelo Teórico do Propulsor

Neste capítulo vamos propor um modelo teórico e experimental simplificado de propulsor centrífugo por desbalanceamento de massas rotativas. Nele são apresentados os corpos que compõem o sistema como um todo, sendo adotado um referencial inercial para o sistema, no laboratório, com origem na interseção dos eixos cartesianos x e y , conforme pode ser visto na figura 3.1, onde uma esfera de massa m gira sobre a superfície interna da circunferência denominada carcaça, impulsionada pela haste h com velocidade angular ω constante, sendo \vec{R}_1 , \vec{R}_2 e \vec{R}_3 , respectivamente, os vetores das posições do centro de massa da esfera, carcaça e haste. Para tanto, a seguir, vamos fazer algumas considerações sobre a oscilação, o deslocamento e a metodologia do experimento.

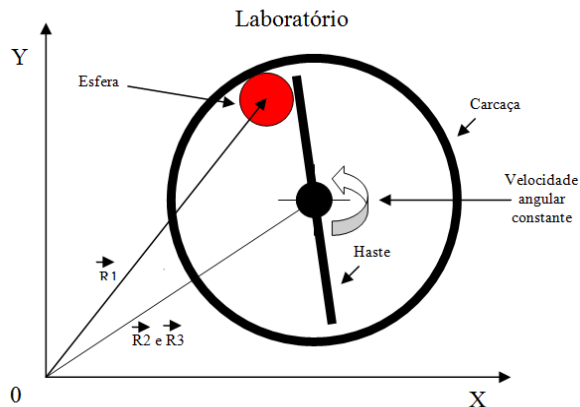


Figura 3.1: Esquema simplificado do propulsor e seu sistema de referência.

3.1 Oscilação da Carcaça do Propulsor

O princípio fundamental do funcionamento do propulsor por desbalanceamento de massas rotativas, é o aproveitamento adequado da oscilação da carcaça do propulsor, proveniente do movimento rotatório executado pela esfera de aço na superfície interna da circunferência, denominada carcaça. Partindo-se desta premissa vamos aprofundar no conhecimento de como se desenvolve o processo de oscilação da carcaça, enquanto a esfera percorre a superfície interna do propulsor. Aqui vamos considerar que o propulsor encontra-se no vácuo e que não existe nenhuma resultante de forças externas atuando sobre o mesmo.

Na figura 3.2 propomos uma representação esquemática de dois instantes do mesmo propulsor durante seu funcionamento, ou seja, com a esfera de aço girando na superfície interna da circunferência ou carcaça do propulsor. Uma no instante t_0 com a esfera na parte superior da carcaça, e outra no instante posterior t_1 com a esfera na parte inferior da carcaça. Neste caso as forças atuantes no sistema durante seu funcionamento, são as forças internas geradas pela interação entre os corpos internos que compõem o sistema. Não havendo forças externas atuando, nem mesmo a do atrito entre a carcaça do propulsor com o meio externo, pois como considerado nesta sessão, o propulsor encontra-se no vácuo.

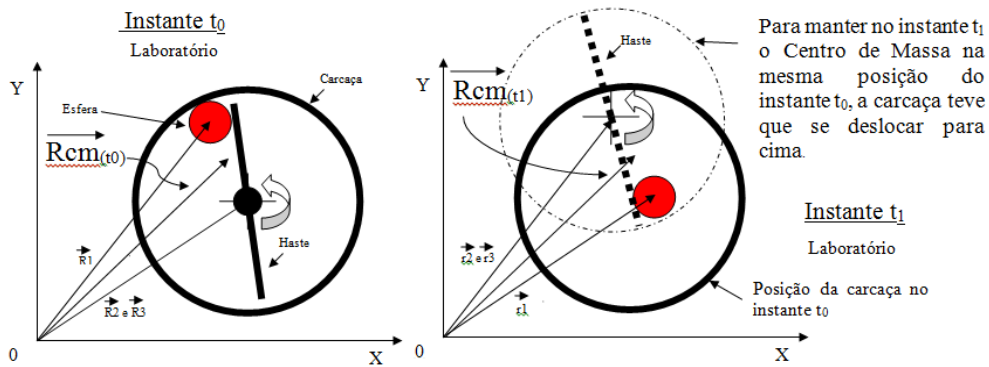


Figura 3.2: Esquema do propulsor nos instantes t_0 e t_1 .

Uma das particularidades intrínsecas do funcionamento deste propulsor é que devido as forças gerada pelo desbalanceamento da massa da esfera, girando no interior do dispositivo, condiciona a mesma a ficar permanentemente em contato com a superfície interna da carcaça, durante todo o tempo em que o propulsor permanecer em funcionamento, podendo-se então, tomar como premissa que a esfera trabalhará sempre acoplada a carcaça e que em nenhum momento durante o funcionamento do propulsor a esfera perderá o contato com a superfície interna da carcaça. Para obter-se o movimento do propulsor é preciso variar a posição do centro de massa em relação a um referencial inercial adotado. Como forças internas não são capazes de gerar movimento e estas são as únicas forças atuante no propulsor proposto, conclui-se que em nenhum momento haverá alteração da posição de seu centro de massa.

Caso a esfera esteja permanentemente acoplada a carcaça, como visto anteriormente, o centro de massa do sistema permanecerá inalterado em dois instante t_0 e t_1 , ou seja, $(\vec{R}_{cm(t_0)} = \vec{R}_{cm(t_1)})$. Para um observador externo, isso se reproduz na mudança de posição da carcaça para cima, como pode ser visto no instante t_1 da figura 3.2. Porém, isso não caracteriza um movimento, na realidade é o esforço da carcaça ou do propulsor em manter o centro de massa do sistema constante ao longo do tempo. Após um ou mais ciclos o que se observa é o propulsor rodando em torno de seu centro de massa, como exposto esquematicamente na figura 3.3.

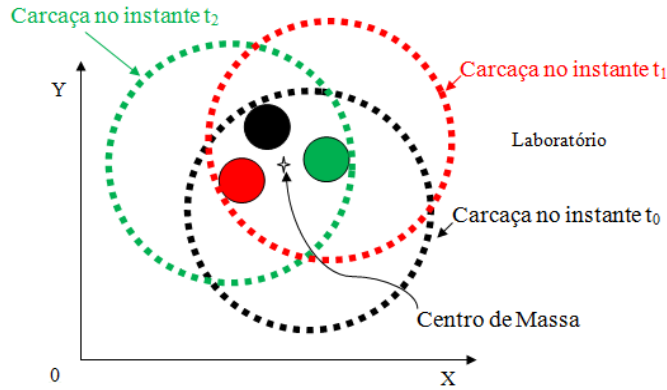


Figura 3.3: Representação ilustrativa do deslocamento da carcaça para cada instante t' .

O centro de massa para o sistema no instante t_0 representado por $(\vec{R}_{cm(t_0)})$ na figura 3.2, é dado pela equação 3.1. Para facilitar todas as partes são consideradas massas pontuais, com seus centros de massas posicionados em seus centros geométricos (ARAÚJO, 2007), então

$$\vec{R}_{cm(t_0)} = \frac{m_e \vec{R}_1 + m_c \vec{R}_2 + m_h \vec{R}_3}{m_e + m_c + m_h}, \quad (3.1)$$

onde:

- m_e representa a massa da esfera;
- m_c a massa da carcaça;
- m_h a massa da haste;
- \vec{R}_1 representa o vetor posição do centro de massa da esfera no instante t_0 ;
- \vec{R}_2 o vetor posição do centro de massa da carcaça no instante t_0 ;
- \vec{R}_3 o vetor posição do centro de massa da haste no instante t_0 .

Decompondo este vetor em suas componentes x e y temos,

$$\begin{aligned} X_{cm} &= \frac{m_e R_{1x} + m_c R_{2x} + m_h R_{3x}}{m_e + m_c + m_h} \\ Y_{cm} &= \frac{m_e R_{1y} + m_c R_{2y} + m_h R_{3y}}{m_e + m_c + m_h} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Para o instante t_1 , o centro de massa $\vec{R}_{cm(t_1)}$ na figura 3.2, é dado por,

$$\vec{R}_{cm(t_1)} = \frac{m_e \vec{r}_1 + m_c \vec{r}_2 + m_h \vec{r}_3}{m_e + m_c + m_h} \quad (3.3)$$

onde:

- \vec{r}_1 representa o vetor posição do centro de massa da esfera no instante t_1 ;
- \vec{r}_2 o vetor posição do centro de massa da carcaça no instante t_1 ;
- \vec{r}_3 o vetor posição do centro de massa da haste no instante t_1 .

Considerando que somente forças internas atuam no sistema, então:

$$\vec{R}_{cm(t_0)} = \vec{R}_{cm(t_1)} \quad (3.4)$$

O que dá

$$\frac{m_e \vec{R}_1 + m_c \vec{R}_2 + m_h \vec{R}_3}{m_e + m_c + m_h} = \frac{m_e \vec{r}_1 + m_c \vec{r}_2 + m_h \vec{r}_3}{m_e + m_c + m_h}. \quad (3.5)$$

Simplificando a equação 3.5 temos,

$$m_e \vec{R}_1 + m_c \vec{R}_2 + m_h \vec{R}_3 = m_e \vec{r}_1 + m_c \vec{r}_2 + m_h \vec{r}_3, \quad (3.6)$$

ou,

$$m_e (\vec{R}_1 - \vec{r}_1) + m_c (\vec{R}_2 - \vec{r}_2) + m_h (\vec{R}_3 - \vec{r}_3) = 0. \quad (3.7)$$

Na 3.2 a diferença entre os vetores posições do centro de massa da carcaça entre os instantes t_0 e t_1 , corresponde ao deslocamento d sofrido pela mesma. Assim podemos escrever a equação 3.8 para a determinação do deslocamento da carcaça do propulsor.

$$d = |\vec{R}_2 - \vec{r}_2| = \left| \frac{m_e (\vec{r}_1 - \vec{R}_1) + m_h (\vec{r}_3 - \vec{R}_3)}{m_c} \right| \quad (3.8)$$

Decompondo a equação 3.6 em suas componentes x e y , obtemos:

$$\begin{aligned} m_e R_{1x} + m_c R_{2x} + m_h R_{3x} &= m_e r_{1x} + m_c r_{2x} + m_h r_{3x} \\ m_e R_{1y} + m_c R_{2y} + m_h R_{3y} &= m_e r_{1y} + m_c r_{2y} + m_h r_{3y} \end{aligned} \quad (3.9)$$

ou,

$$\begin{aligned} m_e(R_{1x} - r_{1x}) + m_c(R_{2x} - r_{2x}) + m_h(R_{3x} - r_{3x}) &= 0 \\ m_e(R_{1y} - r_{1y}) + m_c(R_{2y} - r_{2y}) + m_h(R_{3y} - r_{3y}) &= 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Decompondo a equação 3.8 em suas componentes x e y , obtemos o deslocamento sofrido pela carcaça em cada eixo d_x e d_y , ou seja, podemos escrever

$$\begin{aligned} d_x &= |R_{2x} - r_{2x}| = \left| \frac{m_e(r_{1x} - R_{1x}) + m_h(r_{3x} - R_{3x})}{m_c} \right|, \\ d_y &= |R_{2y} - r_{2y}| = \left| \frac{m_e(r_{1y} - R_{1y}) + m_h(r_{3y} - R_{3y})}{m_c} \right|. \end{aligned} \quad (3.11)$$

3.2 Obtenção do Deslocamento (Restrição por Catracas)

Como o objetivo deste projeto é atestar o deslocamento de uma unidade móvel com rodas, em uma dada direção, movida através de um propulsor por desbalanceamento de massas rotativas a ela acoplada, então nosso modelo teórico será instalado em um carro.

Na figura 3.4 o propulsor ilustrado na figura 3.1 é fixado sobre um carro com quatro rodas, as quais cerceiam o grau liberdade na direção do eixo y , impedindo que o mesmo se desloque para a direita e esquerda, sendo o único grau de liberdade disponível para a unidade móvel se deslocar, o da direção do eixo x nos sentidos para frente e para trás. Considerações necessárias para a evolução do estudo proposto:

- Existência de força de atrito na direção do eixo y , suficiente para evitar o deslocamento da unidade móvel nesta direção;
- Considerar atrito nulo na direção do eixo x , permitindo o deslocamento da unidade móvel nesta direção.

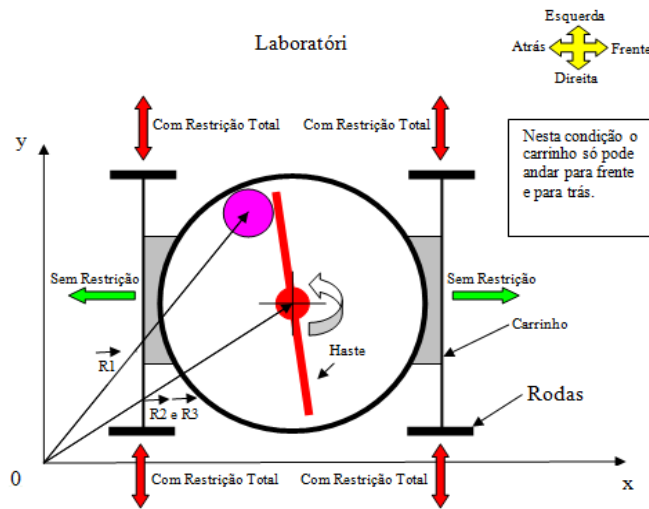


Figura 3.4: Esquema teórico do propulsor fixado sobre o carro e seu sistema de referência inercial com origem no O dos eixos cartesianos x e y .

Nesta circunstância o carro vai oscilar para a frente e para a trás na direção do eixo x , porém esta oscilação é a mesma oscilação proporcionada pela carcaça do propulsor, pois como visto anteriormente, as únicas forças atuantes no propulsor são forças internas, incapazes de gerar movimento por si só, e o fato do mesmo ter sido afixado sobre um carrinho, não muda em nada a origem das forças atuantes sobre o propulsor nesta direção. Neste cenário, conclui-se que na direção do eixo x , por não haver restrição ou força externa atuante, a posição do centro de massa do sistema, em relação ao referencial inercial externo, não se alterará. Logo podemos dizer que a máxima oscilação que o carro pode desenvolver é a mesma oscilação que carcaça do propulsor realiza para manter a posição do centro de massa do sistema em relação a um referencial inercial constante. Já na direção do eixo y , como existe restrição ou atuação de uma força externa sobre o sistema, o centro de massa do sistema se desloca na direção do eixo y em relação a um referencial inercial externo, como pode ser visto na figura 3.5. Entretanto, este deslocamento não é percebido por um observador externo, pois a unidade móvel não altera sua posição nesta direção, devido a restrição imposta pelas rodas.

Para obter-se um deslocamento efetivo da unidade móvel em uma única direção e sentido, na direção do eixo x e sentido positivo, instalamos na roda do carro um sistema de catracas, com o intuito de impedir que as rodas girem para trás, conforme esboçado na figura 3.6 por uma grande e larga seta vermelha. Este dispositivo instalado na roda irá impedir que a carcaça do propulsor possa manter a posição do centro de massa do sistema, na direção do eixo x , inalterado em relação ao referencial no laboratório. Quando for necessário que a carcaça vá para trás, para corrigir a posição do centro de massa, essa ação será impedida pelas catracas na roda através do atrito com o solo. A cada ciclo do

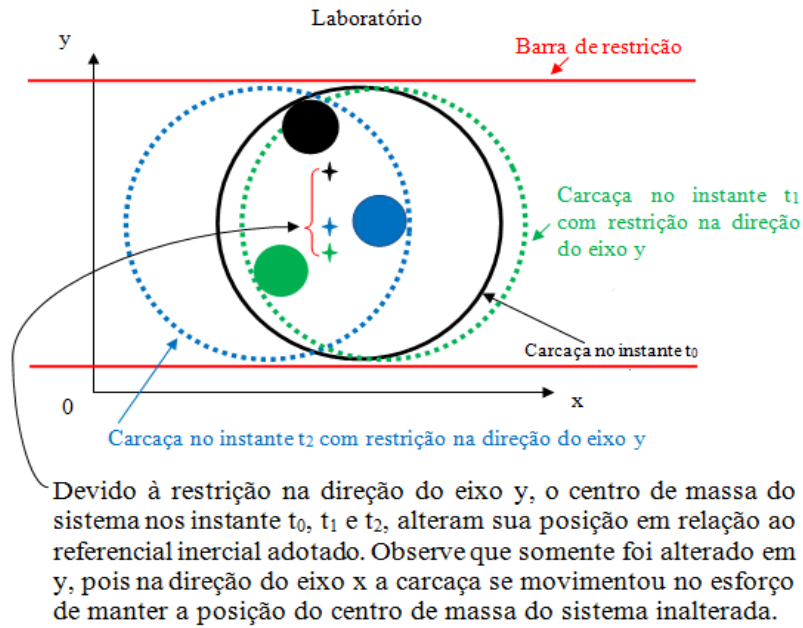


Figura 3.5: Desenho esquemático do propulsor apresentando a oscilação da carcaça na direção do eixo x .

propulsor a posição do centro de massa do sistema é alterada na direção positiva do eixo x , tal fato pode ser visto, esquematicamente, na figura 3.7, caracterizando-se o movimento esperado da unidade móvel movida pelo propulsor por desbalanceamento de massas rotativas.

3.3 Quantificação do Deslocamento

Nesta sessão buscamos desenvolver uma formulação matemática para estimar o deslocamento linear executado pelo propulsor durante a realização de um período T .

Na figura 3.8 (A), podemos observar que as forças responsáveis pelo deslocamento, são ativas ou atuantes no range de 0^0 a 180^0 , pois no restante elas são anuladas pela força de atrito externa, oriundas das reações das rodas (travadas pela ação da catraca) com o piso. Com base nesta observação, podemos dizer que o deslocamento total ocorre na metade do tempo necessário para se realizar uma rotação completa do propulsor, como queremos o deslocamento linear executado pelo propulsor durante o tempo de uma rotação completa de seu rotor, temos que considerar o tempo morto no range dos 180^0 a 360^0 , mesmo não ocorrendo deslocamento. Esta observação é importante, pois como a velocidade angular ω é conhecida, logo o tempo de deslocamento linear para um ciclo também passa a ser conhecido, e é o mesmo que o período T .

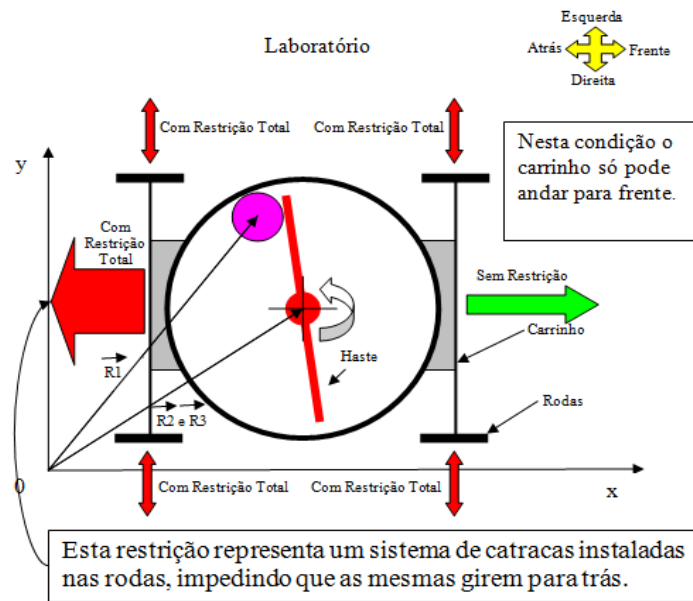


Figura 3.6: Esquema teórico do propulsor fixado sobre o carro com restrições para os lados e para trás.

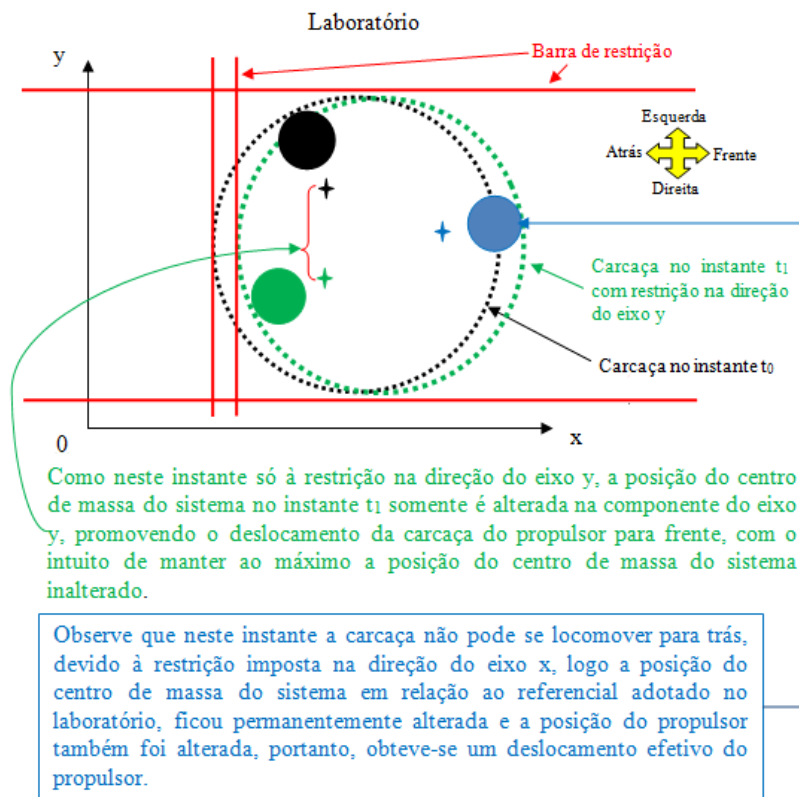


Figura 3.7: Desenho esquemático do efetivo deslocamento do propulsor na direção do eixo x com sentido positivo.

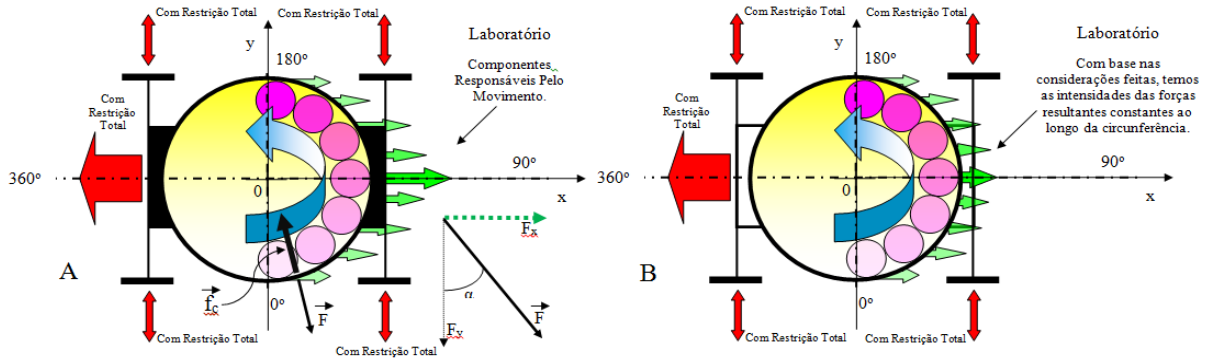


Figura 3.8: Desenho esquemático do efetivo deslocamento do propulsor na direção do eixo x com sentido positivo.

Na mesma figura as intensidades das forças resultantes f_r , discriminadas pelas setas verdes, são as componentes no eixo x da força \vec{F} ao longo da circunferência; podemos observar ainda que a intensidade de f_r é variável ao longo do tempo e é função de $\sin \alpha$, a força \vec{F} tem a mesma direção e intensidade da força centrípeta \vec{f}_c , com sentido oposto, conhecida como força fictícia, pseudoforça centrífuga ou simplesmente força centrífuga.

Para facilitar nosso estudo vamos fazer a seguinte consideração para determinação da intensidade da f_r .

- Considerar que a intensidade da força f_r seja constante ao longo do tempo, entre 0° e 180° ;
- Considerar que a intensidade da força f_r seja a metade da intensidade da força \vec{F} .

Na figura 3.8(B), temos a representação ilustrativa das considerações feitas acima.

Temos ainda que considerar, para efeito da determinação da intensidade da f_r , como a esfera faz seu contato com a parede interna da carcaça. A esfera desliza sobre a parede interna da carcaça, que possui um formato em (V), fazendo com que a mesma toque em dois pontos da carcaça ao mesmo tempo. Este formato de pista foi projetado para evitar que a esfera se choque com as tampas do propulsor quando estiver em movimento rotatório, ficando sempre estabilizada sobre o meio da pista. Na figura 3.9 podemos observar o formato e a forma de contato entre a esfera e a parede interna da carcaça. Observamos que devido a geometria interna da carcaça, deve-se levar em conta o ângulo formado para a determinação da componente resultante, então a intensidade da força

resultante f_r é dada por,

$$f_r = \frac{\vec{F}}{2} \cos 45^\circ \quad (3.12)$$

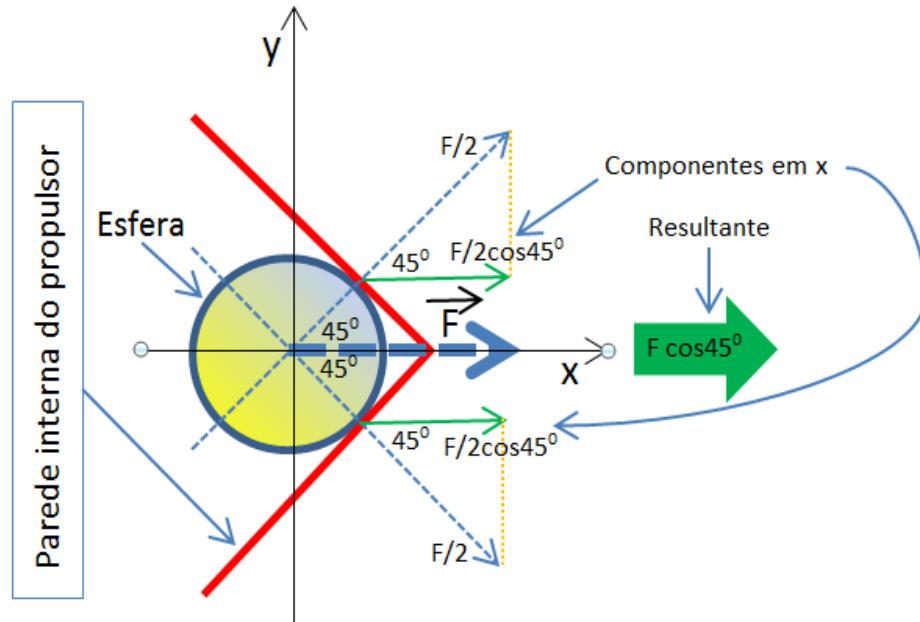


Figura 3.9: Desenho esquemático da esfera em contato com a superfície interna da carcaça.

Como dito anteriormente que a intensidade da força \vec{F} é a mesma da força centrípeta \vec{f}_c , temos,

$$f_r = \frac{m_e a_c}{2} \cos 45^\circ \quad (3.13)$$

logo,

$$f_r = \frac{m_e \omega^2 r}{2} \cos 45^\circ \quad (3.14)$$

Na figura 3.10 consideramos a unidade móvel azul de massa m_{conj} como sendo o conjunto (carro + propulsor), então o que queremos determinar é a distância que a unidade móvel irá percorrer durante o tempo necessário para se completar uma rotação do rotor, ou seja, para um período T , mediante a aplicação de uma determinada força. Como o propulsor encontra-se no interior da unidade móvel, consideramos que a intensidade da força resultante sobre o conjunto f_{rc} seja a mesma que a da força resultante f_r , logo

$$f_{rc} = f_r. \quad (3.15)$$

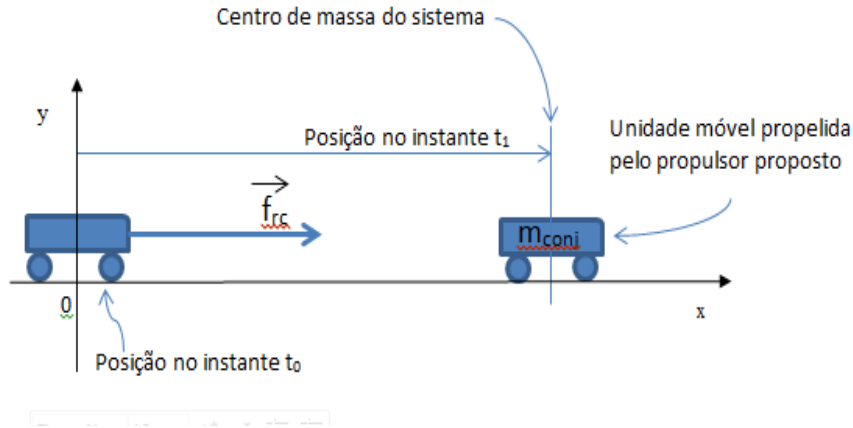


Figura 3.10: Desenho esquemático da unidade móvel se deslocando linearmente.

Vamos considerar que na figura 3.10 a aceleração resultante que atua sobre o conjunto a_{rc} seja constante, sendo assim, podemos dizer que trata-se de um movimento retilíneo uniformemente variável (MRUV) e fazer uso de suas equações. Vale ressaltar que isso é uma consideração para facilitar a obtenção dos resultados, não caracterizando, verdadeiramente, o que ocorre no deslocamento dentro de um período.

A intensidade da força resultante sobre o conjunto f_{rc} pode ser expressa por:

$$f_{rc} = m_{conj} a_{rc} \quad (3.16)$$

logo temos:

$$a_{rc} = \frac{f_{rc}}{m_{conj}} \quad (3.17)$$

substituindo-se (f_{rc}) por (f_r):

$$a_{rc} = \frac{\frac{m_e \omega^2 r}{2} \cos 45^\circ}{m_{conj}} \quad (3.18)$$

ou,

$$a_{rc} = \frac{0,5 m_e \omega^2 r \cos 45^\circ}{m_{conj}}. \quad (3.19)$$

Considerando o movimento como um movimento retilíneo uniformemente variado (MRUV), podemos usar a equação horária das posições para a obtenção do deslocamento do propulsor, logo:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{0,25 m_e \omega^2 r \cos 45^\circ}{m_{conj}} t^2 \quad (3.20)$$

Se estamos interessado no deslocamento linear do propulsor realizado durante um período T , temos:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\omega r} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.21)$$

Substituindo-se o tempo t da equação 3.20 pelo T , obtemos a equação para estimar o deslocamento teórico do propulsor para uma rotação D_t , logo:

$$\begin{aligned} D_t &= x_0 + v_0 \frac{2\pi}{\omega} + \frac{0,25m_e \omega^2 r \cos 45^0}{m_{conj}} \left(\frac{2\pi}{\omega}\right)^2 \\ D_t &= x_0 + v_0 \frac{2\pi}{\omega} + \frac{0,25m_e \omega^2 r \cos 45^0}{m_{conj}} \frac{2\pi^2}{\omega^2} \\ D_t &= x_0 + v_0 \frac{2\pi}{\omega} + \frac{0,25m_e r \cos 45^0 (2\pi)^2}{m_{conj}}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Partindo da observação de que obrigatoriamente o sistema sempre iniciará o ciclo com velocidade inicial nula $v_0 = 0$, e que podemos adotar a posição inicial como sendo nula $x_0 = 0$, temos:

A equação para o cálculo estimado do Deslocamento Linear Teórico D_t do propulsor para um Período é dado por :

$$D_t = \frac{0,25m_e r \cos 45^0 (2\pi)^2}{m_{conj}} \quad (3.23)$$

A equação para o cálculo estimado do Deslocamento Linear Teórico do propulsor para n Períodos dada em função do tempo de deslocamento decorrido em minutos, é dada por D_{t_n} : Uma observação importante é que esta equação não considera as perdas, logo seu resultado será maior do que o encontrado na prática.

$$D_{t_n} = \left(\frac{0,25m_e r \cos 45^0 (2\pi)^2}{m_{conj}}\right) \left(\frac{\omega t_{total}}{60}\right) \quad (3.24)$$

- onde ω é dado em *rpm*;
- onde t_{total} é o tempo total do deslocamento em *s* .

Para um resultado mais preciso vamos inserir na equação 3.24 o Coeficiente de Ajuste ca que considera as perdas.

- Este coeficiente foi retirado dos experimentos realizados no capítulo 5;
- Este modelo matemático foi experimentado apenas com o segundo protótipo, ou seja, com as características do correspondente protótipo (m_{conj} e r), sendo assim, não se pode afirmar que o modelo atenda para outros parâmetros diferentes dos utilizados;
- Este modelo matemático se aplica para rotações de $220rpm$ a $720rpm$, com rotações diferentes das estipuladas, não se tem parâmetros para atestar a eficácia dos resultados.

Logo o Deslocamento Linear Teórico Ajustado do propulsor para n Períodos D_{ta_n} é dado por:

$$D_{ta_n} = \left(\left(\frac{0,25m_e r \cos 45^\circ (2\pi)^2}{m_{conj}} \right) \left(\frac{\omega t_{total}}{60} \right) \right) - \left(\left(\frac{0,25m_e r \cos 45^\circ (2\pi)^2}{m_{conj}} \right) \left(\frac{\omega t_{total}}{60} \right) \right) \frac{ca}{100} \quad (3.25)$$

Onde ca é determinado conforme abaixo:

- De 220 a 290rpm = $ca = 49$;
- De 290 a 426rpm = $ca = 51$;
- De 426 a 580rpm = $ca = 57$;
- De 580 a 720rpm = $ca = 58$;

Modelos Experimentais

Neste capítulo são abordados dois modelos experimentais, o primeiro que não tem correlação com o modelo teórico proposto no capítulo 3, que é abordado no desenvolvimento do segundo experimento.

4.1 Primeiro Modelo Experimental

Por ser mais rápido e de fácil acesso, utilizamos o processo de fabricação artesanal para a confecção deste protótipo, sabendo que este poderia inserir limitações funcionais ao dispositivo como: o limitar a baixas rotações, fragilidade estrutural, entre outras. Como este protótipo tinha apenas o objetivo de aproximar o pesquisador dos efeitos e comportamentos reais do protótipo em funcionamento, este processo atendeu as necessidades de seu propósito, como veremos a seguir.

O protótipo foi elaborado em madeira de balsa e tampa de acrílico, com um diâmetro de $120mm$, utilizando-se duas esferas de aço de $21,5g$ cada, sendo empurradas por uma haste metálica animada por um movimento de rotação fornecida através de um jogo de polias com relação de transmissão de $1/20$, com um motor elétrico de $6v$, conforme apresentado na tabela 4.1, alimentado por uma fonte ajustável de $1,2v$ a $15v$ de $5A$, apresentado na figura 4.1, tendo assim o conjunto todo ficado com uma massa de 325 gramas, conforme apresentado na foto 4.2.

Tabela 4.1: Características Dimensionais e Materiais Utilizados no Primeiro Protótipo.

Item	Material	Dimensão	Peso
Tampa	Acrílico	$\emptyset 120mm$ e Espessura de $2,5mm$	-
Carcaça	Madeira de Balsa	$\emptyset 120mm$ e Espessura de $2,5mm$	-
Relação de Transmissão	Polias de Plástico	Relação de $1/20$	-
Correia	Circular de Borracha	$\emptyset 2mm$	-
Motor	Elétrico	6 Volts	-
Esfera	Aço	$\emptyset 18mm$	$21,5g$
Haste	Aço	Comprimento $119mm$	-
Todo o Conjunto	-	-	$325g$

Este tipo de tecnologia de propulsor é a que obtém sua força resultante através do desbalanceamento intencional do sistema em uma direção pré-determinada. Este sistema, obrigatoriamente, tem que trabalhar com massas idênticas opostas entre si. No nosso

caso, trabalhamos com duas esferas de aço, uma em cada extremidade da haste, como pode ser visto na figura 4.3. Sendo assim, este sistema trabalha a maior parte de seu ciclo balanceado em equilíbrio, porém como pode ser visto no detalhe evidenciado na figura 4.4, existe um setor de 45° que vai gradualmente de um raio de $70mm$ para $60mm$, fazendo com que a esfera ao passar por este setor perca, temporariamente, o contato com a parede da carcaça do propulsor. Neste momento, o sistema passa de balanceado para desbalanceado, pois a esfera oposta aquela que perdeu o contato com a parede, continua exercendo contato, impondo ao sistema um desbalanceamento tendencioso a uma direção. Na figura 4.5 temos uma sequência de fotos apresentando este momento.



Figura 4.1: Fonte ajustável de 1,2 a 15 volts .



Figura 4.2: Sequências de fotos do primeiro protótipo.



Figura 4.3: Perspectiva das esferas em funcionamento.

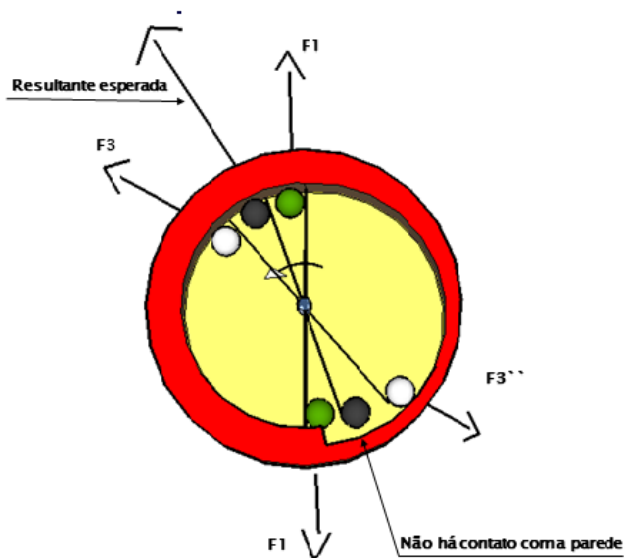


Figura 4.4: Desenho esquemático apresentando 3 instantes diferentes da esfera, a cor verde representando o início do salto, preta no meio do salto, e a branca no final do salto.

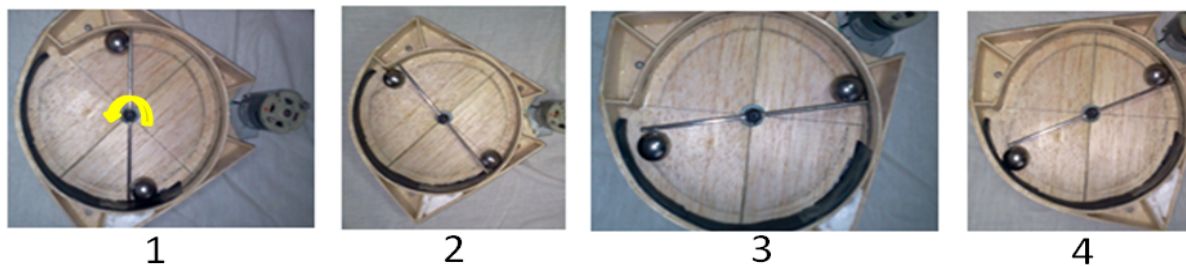


Figura 4.5: Sequência de fotos da esfera durante o salto

4.1.1 Metodologia do Experimento

O dispositivo foi afixado sobre um carrinho com quatro rodas, tipo a de um trem. Este carrinho pode se deslocar livremente para frente e para trás sobre um trilho com atrito praticamente nulo. Quando posto em funcionamento o dispositivo conseguiu deslocar o carrinho no sentido para frente com sucesso, como pode ser visto em filmagem e na foto 4.6. A reprodutibilidade do processo não foi previsível, se mostrando inconstante e irregular, provavelmente devido ao processo de fabricação a que foi submetido o dispositivo. Esta imprevisibilidade comprometeu a coleta de medições e o desenvolvimento de experimentos mais específicos. Com pouco tempo de funcionamento o dispositivo apresentou defeitos estruturais que comprometeram a continuação dos experimentos.

Dados do experimento:

- Percursos = 100 Cm ;
- Total de esferas = 2;
- Massa da esfera = 0,0215 Kg;
- Massa total das esferas responsável pela força resultante = 0,0215 Kg
- Massa do propulsor = 0,325 Kg;
- Massa do carro = 0,612 Kg;
- Massa total do conjunto = 0,941 Kg;
- Raio da carcaça = 0,060 m;
- Velocidades angulares = 426 Rpm.

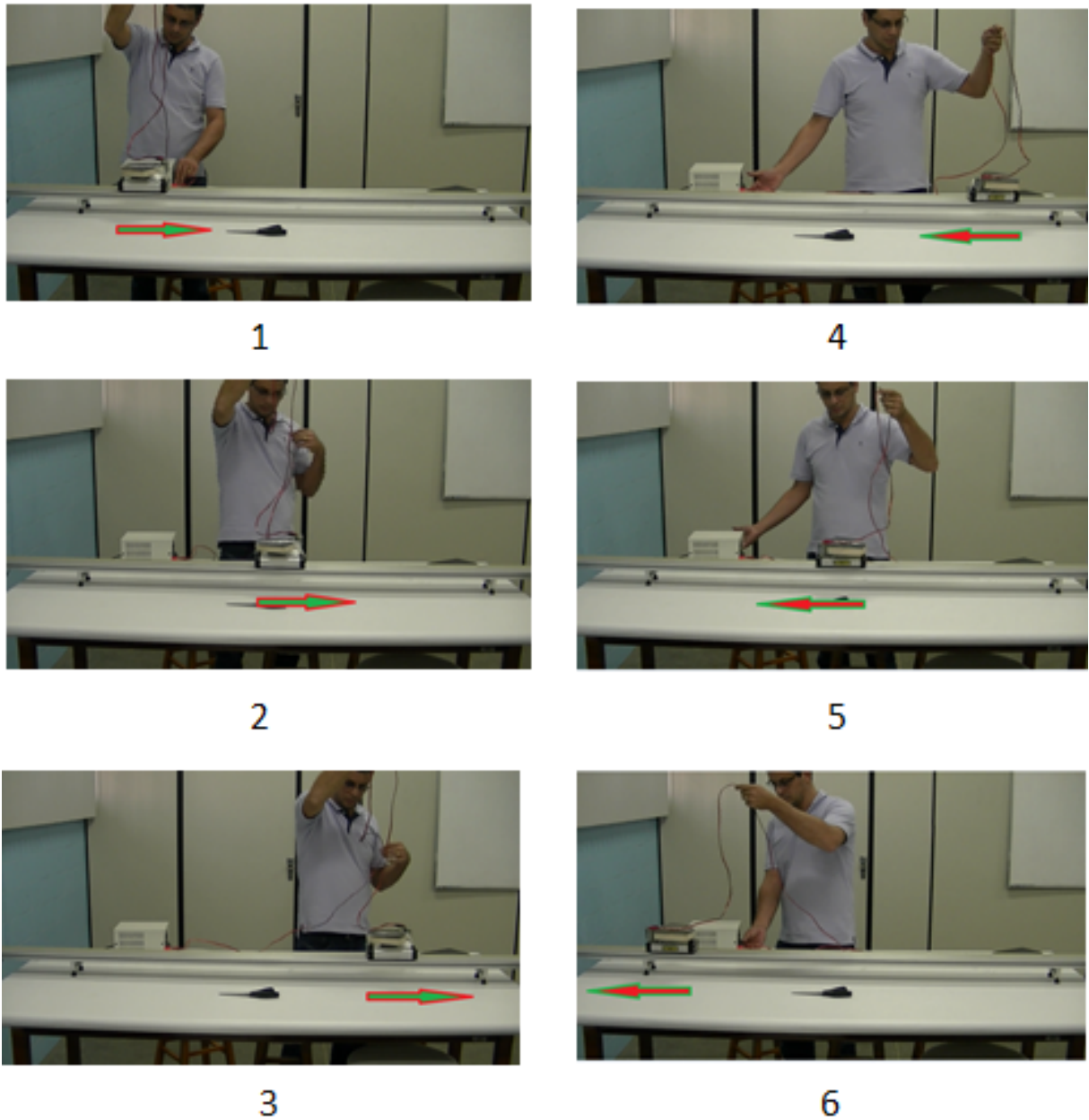


Figura 4.6: Sequências de fotos do propulsor se deslocando no laboratório no sentido da seta (Caminho de ida e volta).

4.2 Segundo Modelo Experimental

Este segundo protótipo, apresentado na figura 4.7, utiliza uma esfera de massa m em uma das extremidades de sua haste e, quando colocada em movimento de rotação, gera uma oscilação da carcaça devido ao desbalanceamento causado pela massa excêntrica, seciando-se todos os seus graus de liberdades, exceto o sentido para frente. Tal fato faz com que o propulsor se desloque para frente. Para darmos dimensões ao propulsor,

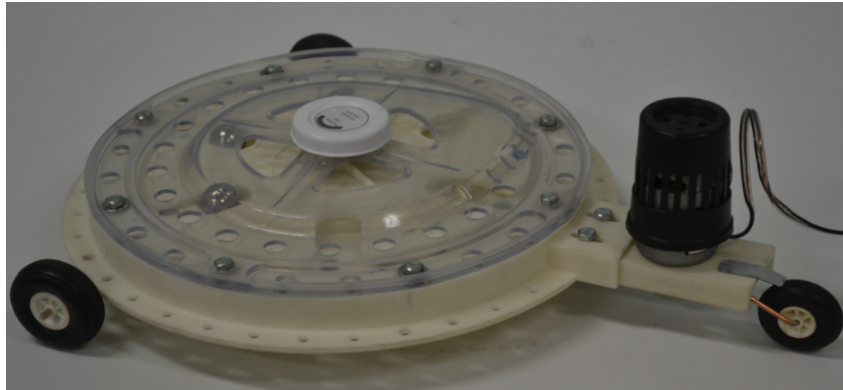


Figura 4.7: Foto do segundo protótipo.

utilizamos dados experimentais verificados no primeiro experimento, como a massa da esfera com 23 gramas, e o raio da carcaça como sendo 0,071 metros. Esses dois parâmetros são fundamentais para um resultado positivo do propulsor, pois eles são basicamente responsáveis pela intensidade da força resultante.

O conjunto de 4 peças (Tampa, Base, Rotor e Suporte) do protótipo apresentado na figura 4.8 foram projetados no Solidworks e confeccionados através do processo de prototipagem rápida em uma impressora 3D com resina fotocurável similar / equivalente às propriedades físico-mecânicas do plástico ABS. Dentre os inúmeros testes que foram realizados, foram previstos testes cinemáticos, onde os comportamentos físicos foram avaliados a partir de filmagem durante sua utilização, logo para análise de movimentos internos, a peça tampa teve que ser obrigatoriamente transparente.

Outro aspecto importante a ser destacado, é que como todo sistema de prototipagem rápida apresenta variações e erros intrínsecos a cada sistema, foi prudente que todas as peças fossem fabricadas por um único fornecedor, por diversos motivos: cada sistema de prototipagem possui as suas próprias tolerâncias, margens de erros, especificidades dos materiais utilizados. Mesmo que as peças fossem executadas a partir de sistemas iguais, porém utilizando-se fornecedores diferentes, seria impossível que todas as variáveis fossem iguais, sendo acrescentado, deste modo, variáveis indesejáveis ao projeto, o que fatalmente resultaria em falsas análises e resultados.

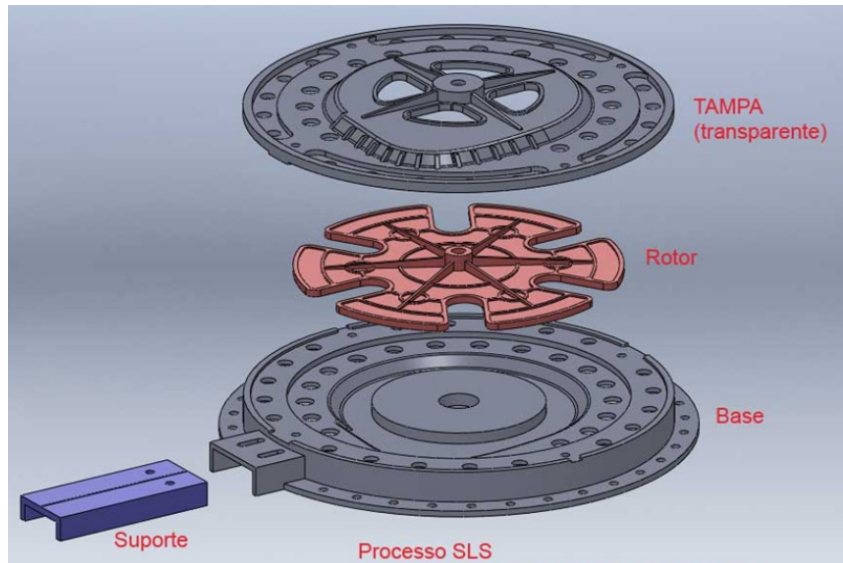


Figura 4.8: Conjunto de 4 peças do propulsor.

Na figura 4.9 temos o desenho em Solidworks da pista interna da carcaça, onde a esfera exerce seu contato com a parede da mesma. Na figura 4.10 temos o esboço da montagem do rotor com a pista interna da carcaça.

Para o acionamento do rotor foi utilizado um motor elétrico de alto desempenho da Hobbe número 4471 power 600/24 de 8,4 volts, apresentado na figura 4.11. Para o sistema de transmissão um jogo de polias com relação de 1/2 com correia circular de borracha, como pode ser visto no detalhe da figura 4.12. O rotor do propulsor foi projetado para trabalhar com 1 ou até 6 esferas. No nosso experimento foram colocadas três esferas atuantes no rotor do propulsor, como pode ser visto na figura 4.13. Para facilitar o cálculo aproximado do deslocamento somamos a massa das três esferas e consideramos como sendo uma única massa. Logo a massa da esfera considerada para o experimento passa a ser de 0,069 Kg, e a massa total do conjunto 1,2 Kg, conforme apresentado na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Características Dimencionais e Materiais Utilizados no Segundo Protótipo.

Item	Material	Dimensão	Peso
Tampa	Resina Foto Curável Transparente	Ø143mm	-
Base	Resina Foto Curável	Ø143mm	-
Rotor	Resina Foto Curável	Ø180mm	-
Suporte	Resina Foto Curável	-	-
Relação de Transmissão	Polias de Plástico	Relação de 1/2	-
Correia	Circular de Borracha	Ø3mm	-
Motor	Elétrico	8,4 Volts	-
Esfera	Aço	Ø20mm	23g
Todo o Conjunto	-	-	1,2kg

Para a medição do tempo de deslocamento foi utilizado um cronômetro digital da Azeheb, com sensores foto elétricos para coleta dos dados, figura 4.14. Por questão de disponibilidade trabalhamos com cinco velocidade angulares nos experimentos, 220 rpm, 290 rpm, 426 rpm, 580 rpm e 720 rpm. Essas velocidades foram medidas com um tacômetro digital da Instrutemp modelo TC-5030, mostrado na foto 4.15.

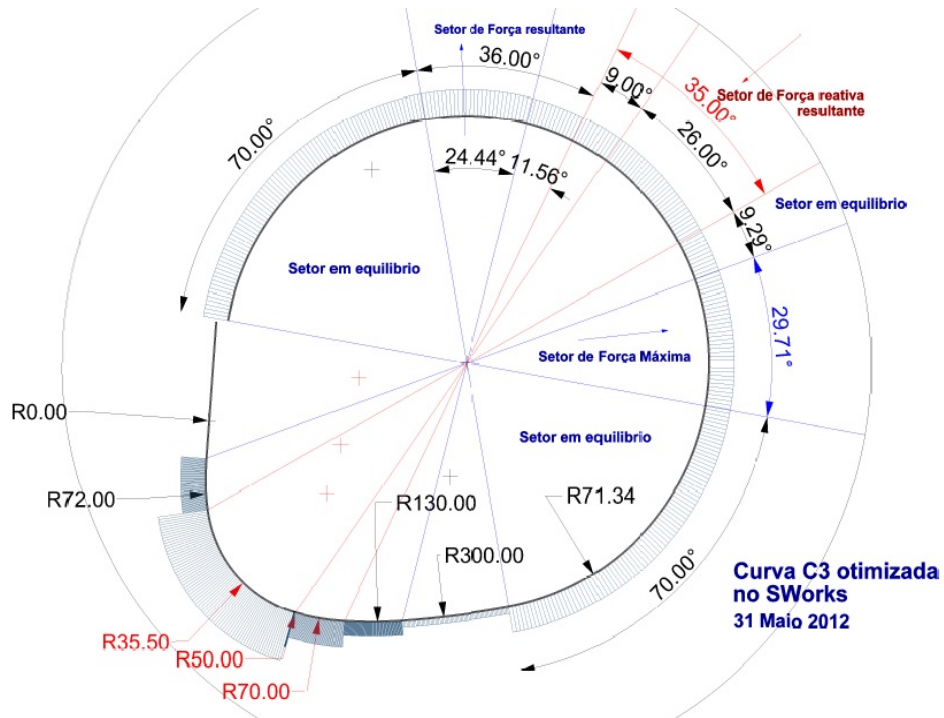


Figura 4.9: Desenho da pista interna da carcaça

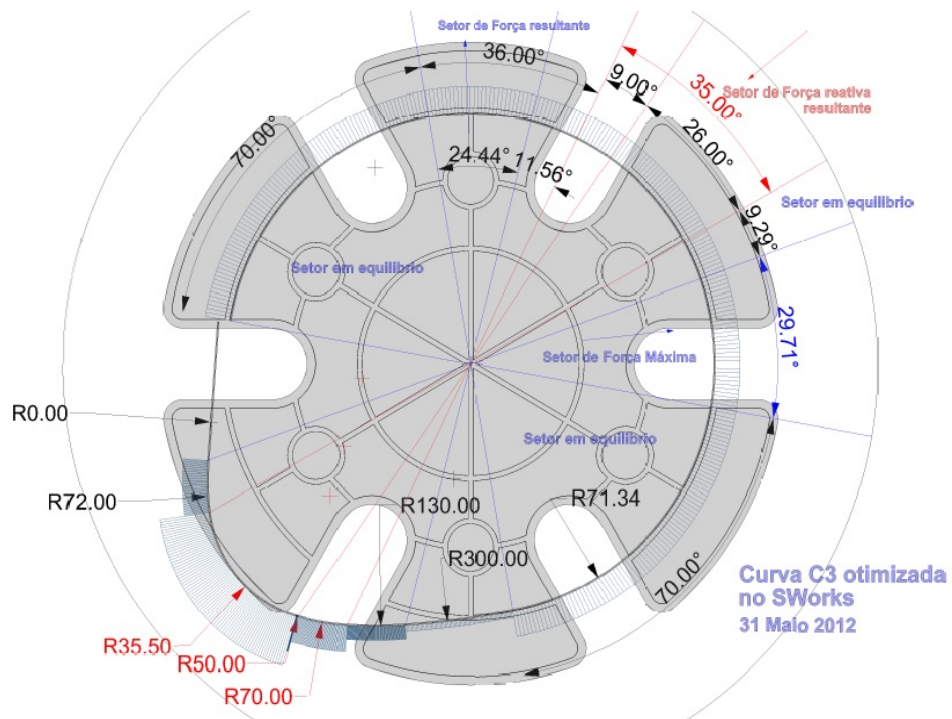


Figura 4.10: Esboço da montagem da carcaça com o rotor



Figura 4.11: Foto do motor utilizado no propulsor.

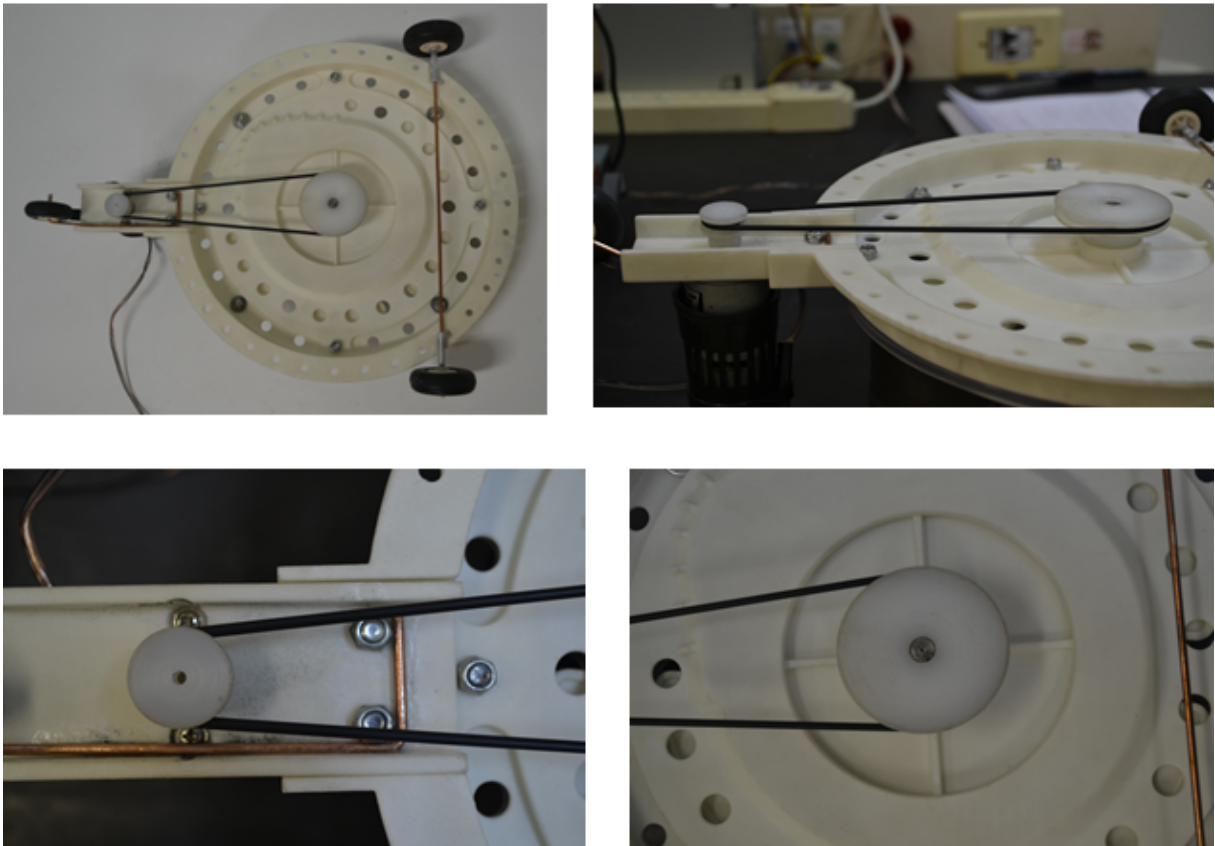


Figura 4.12: Detalhes do sistema de transmissão motor/rotor.

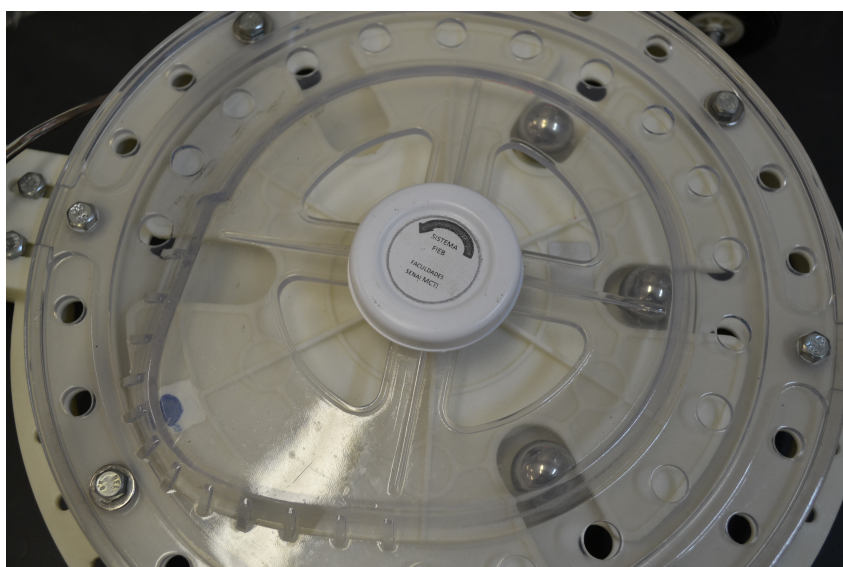


Figura 4.13: Detalhe da distribuição das três esteras no rotor.



Figura 4.14: Foto do cronômetro Azeheb.



Figura 4.15: Foto do tacômetro digital TC-5030.

4.2.1 Metodologia do Experimento

O protótipo se deslocou em laboratório conforme planejado, sua reproduzibilidade foi inquestionável e constante, seu movimento previsível e de fácil controle, conforme podemos ver na filmagem e na figura 4.16. Logo, com experimento podemos coletar tempos em função da distância percorrida pelo propulsor, com o intuito de verificar as características do movimento, através da análise de seu gráfico, espaço x tempo, levantado em laboratório.

Para cada uma das cinco velocidades angulares, predeterminamos 13 percursos diferentes de distâncias, ou seja, de 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm, 45 cm, 50 cm, 55 cm, 60 cm, 65 cm e 70 cm. Para cada um desses percursos foram tirados 4 tomadas de tempos, e o tempo a ser considerado em cada percurso foi a média entre os 4.

O experimento baseia-se em fazer com que o propulsor percorra na bancada de teste uma distância predeterminada, sendo medido o tempo em que o mesmo leva para ir de uma extremidade a outra. No início do percurso o propulsor passa pelo sensor fotoelétrico iniciando a medição do tempo no cronômetro digital, quando o propulsor passa pelo segundo sensor fotoelétrico na outra extremidade, o cronômetro para de marcar o tempo, sendo feito a coleta do tempo decorrido através da leitura do display digital com três casas decimais de precisão.

Na figura 4.17 podemos ver a bancada de teste como seus respectivos componentes utilizados para os experimentos. Quando era necessário alterar a distância do percurso para um dos 13 pontos predeterminados, alterava-se a distância marcada na figura 4.17, adequando-se a bancada de teste para o percurso em questão.

Dados do experimento:

- Percursos = 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm, 45 cm, 50 cm, 55 cm, 60 cm, 65 cm e 70 cm ;
- Total de esferas = 3;
- Massa da esfera = 23 g;
- Massa total das esferas responsável pela força resultante = 0,069 Kg
- Massa total do conjunto = 1,2 Kg;

- Raio da carcaça = 0,071 m;
- Velocidades angulares = 290 Rpm e 426 Rpm.

4.2.2 Cálculo do Deslocamento Teórico em Um Ciclo

Com base na equação 3.23, calculamos o valor estimado do Deslocamento Linear Teórico do propulsor para um Período D_t , com o intuito de comparar este valor com o valor do Deslocamento Linear Prático do Propulsor para um Período D_p , encontrado no experimento em laboratório, logo temos:

$$D_t = \frac{0,25m_e r \cos 45^\circ (2\pi)^2}{m_{conj}}$$

$$D_t = \frac{0,25 \times 0,069 \times 0,071 \cos 45^\circ (2\pi)^2}{1,2}$$

$$D_t = \frac{0,25 \times 0,069 \times 0,071 \times 0,707 \times 39,47}{1,2}$$

$$D_t = 0,0284m \tag{4.1}$$

Logo, encontramos para o Deslocamento Linear Teórico do Propulsor para um Período D_t o valor estimado de $D_t = 0,0284m$.

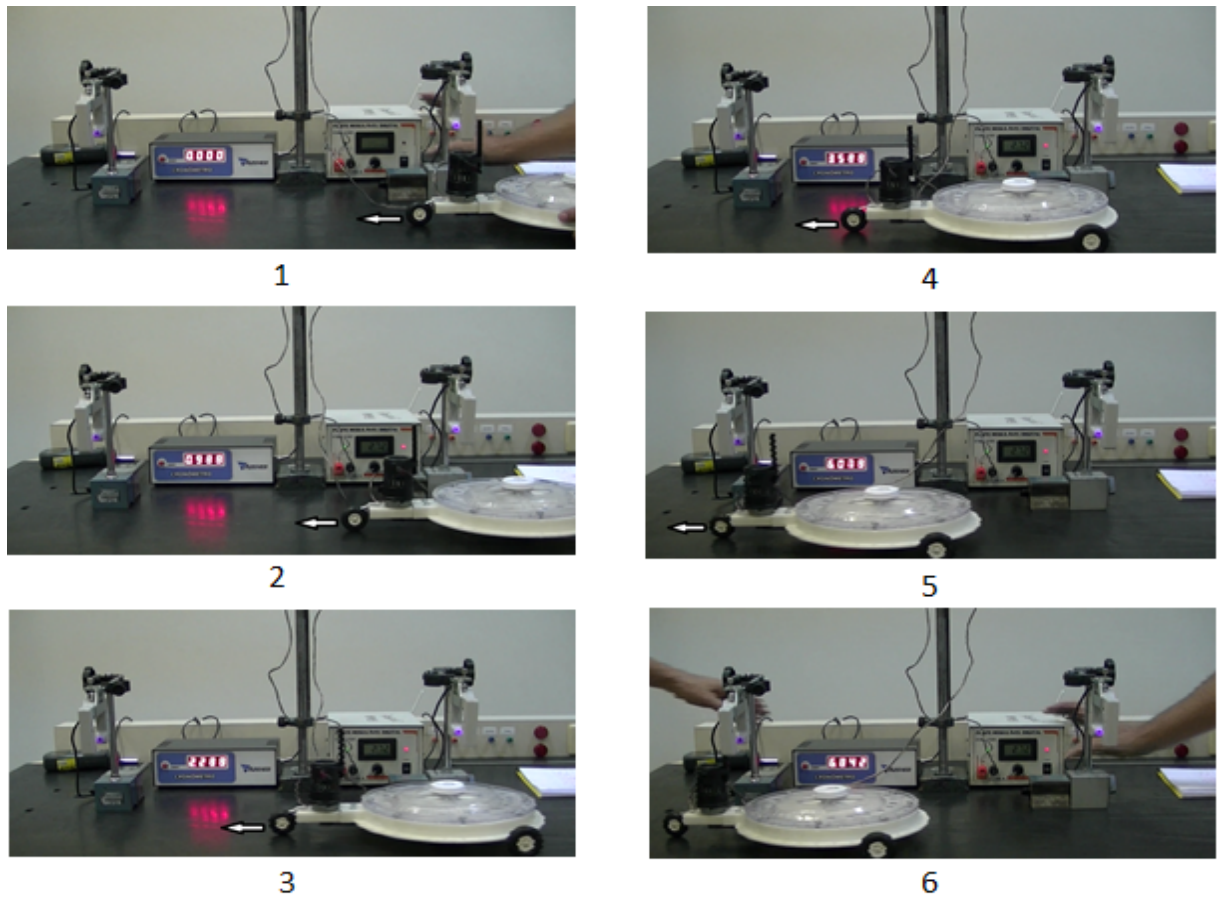


Figura 4.16: Sequências de fotos do propulsor se deslocando no laboratório no sentido da seta.

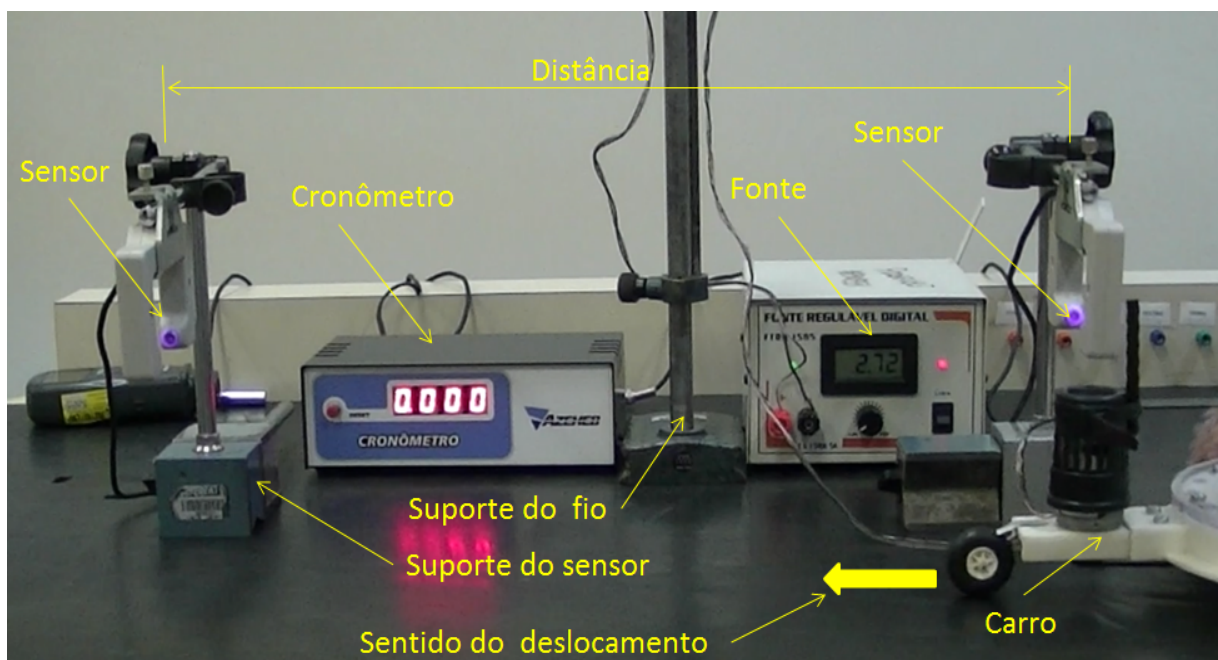


Figura 4.17: Foto da bancada montada para os experimentos.

Resultados, Conclusões e Perspectivas futuras

Neste apresentamos os resultados observados durante os dois experimentos, feitas as conclusões e propostos trabalhos futuros como veremos a seguir:

5.1 Resultados do Primeiro Experimento

Embora este protótipo tenha conseguido se deslocar com sucesso no laboratório, devido a sua fragilidade e instabilidade estrutural, a reprodutibilidade do processo não foi constante e previsível, dificultando, na maioria das tentativas, a coleta de dados experimentais. Assim com relação aos nossos resultados experimentais só foi possível coletar uma informação confiável antes do dispositivo apresentar defeito estrutural, na qual o protótipo percorreu 1 metro em 9,22 segundos. Considerando que o protótipo realiza 7,1 rotações em 1 segundo, logo em 9,22 segundos ele fará 65,462 rotações, ou se preferir, ciclos completos. Se queremos saber qual o valor do Deslocamento Linear Prático do Propulsor para um Período D_p , então dividirmos a distância percorrida pelo protótipo pelo número de ciclos realizados durante este percurso, sendo assim, o valor prático do deslocamento encontrado foi $D_p = 1/65,462 = 0,0152m$.

Uma observação que podemos fazer com relação ao seu movimento, é que se desenvolveu de forma contínua com muita suavidade, com pouca presença de vibrações ao longo de seu percurso. Também podemos salientar a relação força peso, onde uma esfera de aço pesando apenas 21,5g foi responsável por deslocar o conjunto inteiro pesando 0,941 Kg, com velocidade média de 0,108 m/s.

Uma grande vantagem percebida deste dispositivo sobre o segundo modelo, é que neste modelo não necessita de nenhum sistema de intervenção nas rodas para impedir que o carro ande para trás, pois este dispositivo é projetado para anular temporariamente as forças responsáveis por este deslocamento indesejável.

5.2 Resultados do Segundo Experimento

O protótipo se deslocou em laboratório com sucesso e dentro do esperado, sua reprodutibilidade foi inquestionável e constante, seu movimento previsível e de fácil controle.

Nesta sessão apresentamos, para as cinco velocidades angulares especificadas, os resultados das medições para os 13 percursos predeterminados.

Nas tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 são apresentados os resultados obtidos durante todos os experimentos. Para o cálculo do Deslocamento Linear Prático do Propulsor para um Período (D_p), que consta nas mesmas tabelas, utilizamos a equação 5.1:

$$D_p = \frac{\frac{\text{Distancia}}{\text{Tempo}}}{\text{Velocidade}} \quad (5.1)$$

Onde o valor da Distância x é tirado da tabela, o valor do Tempo é o tempo médio $\langle t \rangle$ da tabela e a Velocidade é a velocidade angular ω da tabela em hz .

O valor de $diff$ nas tabelas corresponde a quanto, em percentual, D_{t_n} é maior que x .

A tabela 5.1 traduz para o protótipo em questão, a velocidade angular mínima em que se pode trabalhar, pois abaixo desta não se consegue uma constância nas rotações e consequentemente as variações são muitas, inviabilizando qualquer tomada de medições, mesmo assim com esta velocidade percebemos variações representativas nas rotações, conforme podemos apreciar nos resultados apresentados na tabela em relação as demais rotações. As medições desta tabela vão até a distancia de $0,45m$, devido ao fato de que o cronometro digital tem a capacidade de registrar no máximo tempos até $9,999s$

Tabela 5.1: Resultados Experimentais para $\omega = 220rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{t_n}(m)$	$diff(\%)$
0,10	2,385	2,173	2,467	2,131	2,289	$1,191 \times 10^{-2}$	0,044	0,238	58
0,15	3,068	2,802	3,000	2,877	3,918	$1,393 \times 10^{-2}$	0,051	0,306	63
0,20	3,739	3,875	3,751	3,918	3,821	$1,428 \times 10^{-2}$	0,052	0,398	50
0,25	4,482	4,853	4,951	4,656	4,736	$1,440 \times 10^{-2}$	0,053	0,493	49
0,30	5,305	5,202	5,288	5,075	5,218	$1,568 \times 10^{-2}$	0,057	0,543	45
0,35	6,292	6,420	6,630	6,938	6,570	$1,453 \times 10^{-2}$	0,053	0,684	49
0,40	7,662	7,600	7,802	8,001	7,766	$1,405 \times 10^{-2}$	0,052	0,809	51
0,45	9,751	9,445	9,571	9,287	9,514	$1,290 \times 10^{-2}$	0,047	0,991	55

Tabela 5.2: Resultados Experimentais para $\omega = 290rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{t_n}(m)$	$dif(\%)$
0,10	1,363	1,358	1,375	1,396	1,373	$1,507 \times 10^{-2}$	0,073	0,188	47
0,15	2,013	1,996	1,996	1,942	1,987	$1,562 \times 10^{-2}$	0,076	0,273	45
0,20	2,776	2,787	2,641	2,653	2,714	$1,525 \times 10^{-2}$	0,074	0,373	46
0,25	3,569	3,409	3,424	3,421	3,463	$1,494 \times 10^{-2}$	0,072	0,475	47
0,30	4,498	4,485	4,516	4,493	4,498	$1,380 \times 10^{-2}$	0,067	0,617	51
0,35	4,907	4,892	4,863	4,889	4,888	$1,482 \times 10^{-2}$	0,072	0,671	48
0,40	5,517	5,416	5,463	5,491	5,472	$1,512 \times 10^{-2}$	0,073	0,751	47
0,45	6,171	6,185	6,287	6,276	6,230	$1,494 \times 10^{-2}$	0,072	0,855	47
0,50	6,792	6,803	6,842	6,792	6,807	$1,520 \times 10^{-2}$	0,073	0,934	46
0,55	7,420	7,489	7,512	7,652	7,518	$1,514 \times 10^{-2}$	0,073	1,032	47
0,60	8,172	8,284	8,171	8,026	8,163	$1,521 \times 10^{-2}$	0,074	1,121	46
0,65	8,759	8,759	8,892	8,883	8,823	$1,524 \times 10^{-2}$	0,074	1,211	46
0,70	9,673	9,972	9,865	9,852	9,796	$1,479 \times 10^{-2}$	0,071	1,345	48

Tabela 5.3: Resultados Experimentais para $\omega = 426rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{t_n}(m)$	$dif(\%)$
0,10	1,038	1,059	1,035	1,059	1,043	$1,351 \times 10^{-2}$	0,096	0,210	52
0,15	1,532	1,522	1,630	1,597	1,570	$1,345 \times 10^{-2}$	0,096	0,317	53
0,20	2,105	2,090	2,181	2,182	2,140	$1,317 \times 10^{-2}$	0,093	0,432	54
0,25	2,778	2,720	2,668	2,600	2,692	$1,308 \times 10^{-2}$	0,093	0,543	54
0,30	3,286	3,200	3,263	3,264	3,253	$1,299 \times 10^{-2}$	0,092	0,656	54
0,35	3,743	3,757	3,821	3,902	3,806	$1,295 \times 10^{-2}$	0,092	0,767	54
0,40	4,437	4,344	4,419	4,401	4,400	$1,280 \times 10^{-2}$	0,091	0,887	55
0,45	4,953	5,046	4,981	5,074	5,014	$1,264 \times 10^{-2}$	0,090	1,011	55
0,50	5,672	5,509	5,627	5,703	5,628	$1,251 \times 10^{-2}$	0,089	1,135	56
0,55	6,184	6,022	5,876	6,272	6,089	$1,272 \times 10^{-2}$	0,090	1,228	55
0,60	6,398	6,395	6,460	6,454	6,427	$1,315 \times 10^{-2}$	0,093	1,296	54
0,65	7,364	7,129	7,299	7,334	7,282	$1,257 \times 10^{-2}$	0,089	1,468	56
0,70	7,808	7,881	7,965	7,999	7,913	$1,246 \times 10^{-2}$	0,088	1,596	56

Tabela 5.4: Resultados Experimentais para $\omega = 580rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{t_n}(m)$	$diff(\%)$
0,10	0,915	0,920	0,999	1,016	0,963	$1,075 \times 10^{-2}$	0,104	0,264	62
0,15	1,278	1,295	1,300	1,388	1,315	$1,180 \times 10^{-2}$	0,114	0,361	58
0,20	1,742	1,732	1,778	1,852	1,776	$1,165 \times 10^{-2}$	0,113	0,488	59
0,25	2,275	2,155	2,143	2,147	2,180	$1,186 \times 10^{-2}$	0,115	0,598	58
0,30	2,692	2,700	2,652	2,763	2,702	$1,149 \times 10^{-2}$	0,111	0,742	60
0,35	3,046	3,100	3,111	3,139	3,099	$1,168 \times 10^{-2}$	0,113	0,851	59
0,40	3,734	3,720	3,699	3,673	3,707	$1,116 \times 10^{-2}$	0,108	1,018	61
0,45	3,813	3,850	3,902	3,966	3,883	$1,199 \times 10^{-2}$	0,116	1,066	58
0,50	4,726	4,455	4,431	4,471	4,521	$1,144 \times 10^{-2}$	0,111	1,241	60
0,55	5,394	5,112	5,105	5,108	5,180	$1,098 \times 10^{-2}$	0,106	1,422	61
0,60	5,887	5,850	5,726	5,684	5,787	$1,073 \times 10^{-2}$	0,104	1,589	62
0,65	6,096	6,100	6,050	6,035	6,070	$1,108 \times 10^{-2}$	0,107	1,666	61
0,70	6,692	6,651	6,428	6,604	6,594	$1,098 \times 10^{-2}$	0,106	1,810	61

Tabela 5.5: Resultados Experimentais para $\omega = 720rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{t_n}(m)$	$diff(\%)$
0,10	1,048	1,010	1,009	0,881	0,987	$8,443 \times 10^{-3}$	0,101	0,336	70
0,15	1,357	1,205	1,100	1,125	1,197	$1,044 \times 10^{-2}$	0,125	0,408	63
0,20	1,568	1,449	1,449	1,455	1,480	$1,126 \times 10^{-2}$	0,135	0,504	60
0,25	1,759	1,701	1,652	1,633	1,686	$1,235 \times 10^{-2}$	0,148	0,575	56
0,30	2,053	2,010	2,008	1,946	2,004	$1,247 \times 10^{-2}$	0,150	0,683	56
0,35	2,394	2,328	2,278	2,250	2,313	$1,261 \times 10^{-2}$	0,151	0,788	56
0,40	2,491	2,502	2,499	2,510	2,501	$1,333 \times 10^{-2}$	0,160	0,852	53
0,45	2,961	2,890	2,900	2,868	2,905	$1,291 \times 10^{-2}$	0,155	0,990	55
0,50	3,300	2,835	3,201	3,105	3,110	$1,340 \times 10^{-2}$	0,161	1,060	53
0,55	3,555	3,420	3,415	3,434	3,456	$1,326 \times 10^{-2}$	0,159	1,178	53
0,60	3,668	3,708	3,899	4,010	3,821	$1,308 \times 10^{-2}$	0,157	1,302	54
0,65	4,333	4,230	4,150	4,107	4,205	$1,288 \times 10^{-2}$	0,155	1,433	55
0,70	4,694	4,604	4,651	4,691	4,660	$1,252 \times 10^{-2}$	0,150	1,588	56

Na figura 5.1 é apresentado o gráfico Posição x Tempo prático (x x $\langle t \rangle$), relativo aos experimentos com velocidade angular de $220rpm$, Observe que ALFA corresponde a tangente do ângulo de inclinação da reta, logo ALFA = VELOCIDADE MÉDIA. Sendo assim para o gráfico ajustado, a velocidade média a ser considerada passa a ser de $v = 0,04899m/s$.

Na figura 5.2 é apresentado o gráfico Posição x Tempo teórico sem considerar as perdas (D_{t_n} x $\langle t \rangle$), para a velocidade angular de $220rpm$, Observe que ALFA corresponde a tangente do ângulo de inclinação da reta. Sendo assim para o gráfico ajustado, a velocidade média teórica a ser considerada passa a ser de $v = 0,10419m/s$.

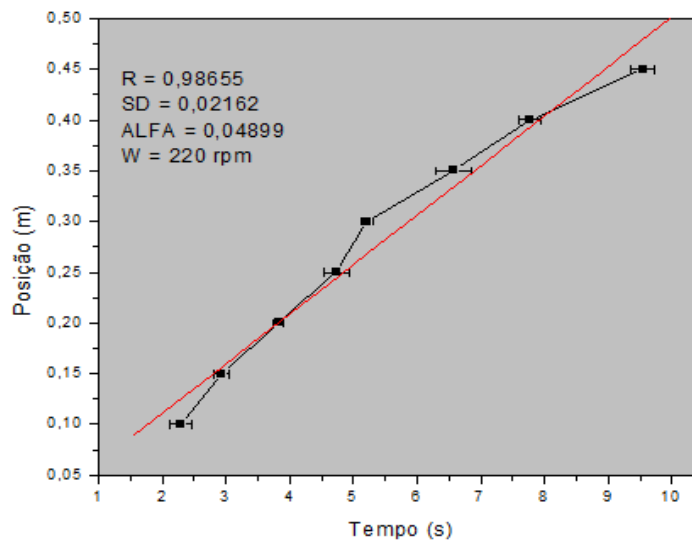


Figura 5.1: Gráfico Posição x Tempo prático ($x \times t$) com velocidade angular de 220rpm.

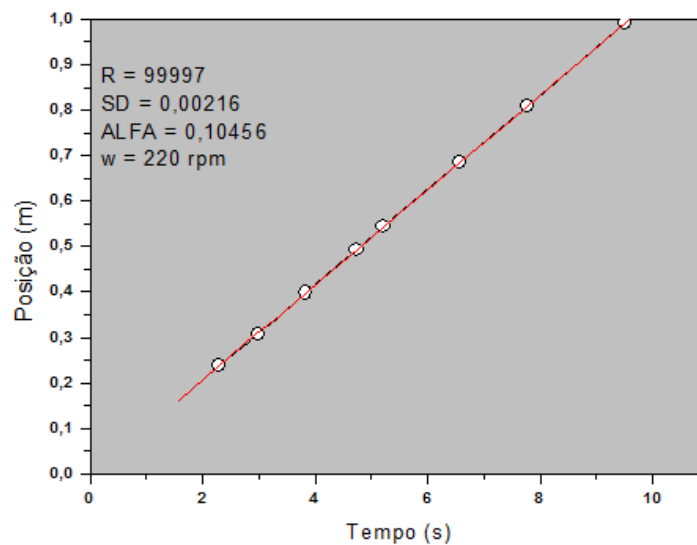


Figura 5.2: Gráfico Posição x Tempo teórico ($D_{t_n} \times t$) com velocidade angular de 220rpm.

Na figura 5.3 é apresentado o gráfico Posição x Tempo prático ($x \times t$), relativo aos experimentos com velocidade angular de 290rpm, Observe que ALFA corresponde a tangente do ângulo de inclinação da reta, logo $ALFA = VELOCIDADE \text{ MÉDIA}$. Sendo assim para o gráfico ajustado, a velocidade média a ser considerada passa a ser de $v = 0,072m/s$.

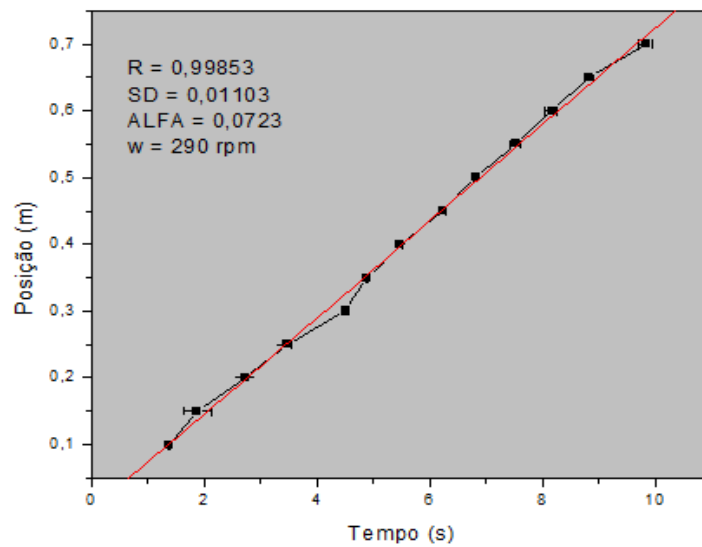


Figura 5.3: Gráfico Posição x Tempo prático ($x \times t$) com velocidade angular de $290rpm$.

Na figura 5.4 é apresentado o gráfico Posição x Tempo teórico sem considerar as perdas ($D_{t_n} \times t$), para a velocidade angular de $290rpm$, Observe que ALFA corresponde a tangente do ângulo de inclinação da reta, logo $ALFA = VELOCIDADE\ MÉDIA$. Sendo assim para o gráfico ajustado, a velocidade média teórica a ser considerada passa a ser de $v = 0,1373m/s$.

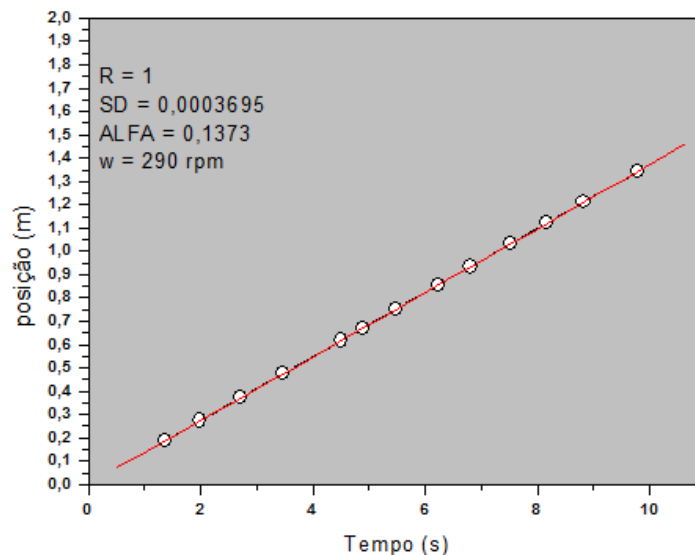


Figura 5.4: Gráfico Posição x Tempo teórico ($D_{t_n} \times t$) com velocidade angular de $290rpm$.

Na figura 5.5 é apresentado o gráfico Posição x Tempo prático ($x \times t$), relativo aos experimentos com velocidade angular de $426rpm$, Observe que ALFA corresponde a tangente do ângulo de inclinação da reta, logo $ALFA = VELOCIDADE\ MÉDIA$. Sendo

assim para o gráfico ajustado, a velocidade média a ser considerada passa a ser de $v = 0,08815m/s$.

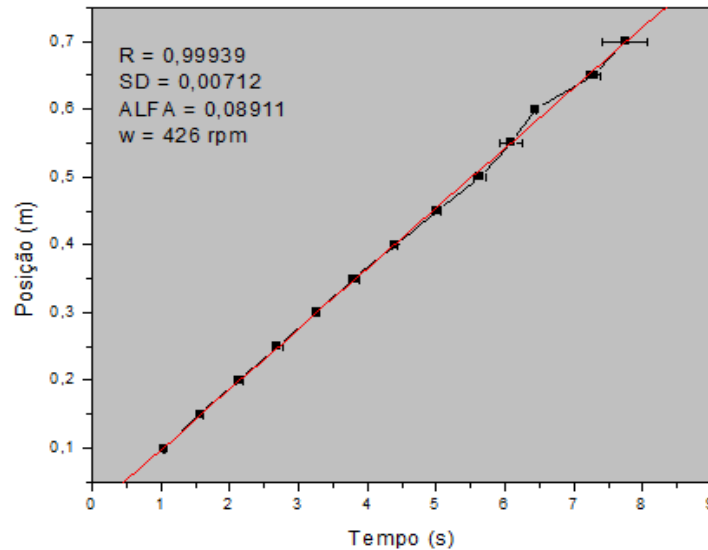


Figura 5.5: Gráfico Posição x Tempo prático ($x \times t$) com velocidade angular de 426rpm.

Na figura 5.6 é apresentado o gráfico Posição x Tempo teórico sem considerar as perdas ($D_{t_n} \times t$), para a velocidade angular de 426rpm, Observe que ALFA corresponde a tangente do ângulo de inclinação da reta, logo ALFA = VELOCIDADE MÉDIA. Sendo assim para o gráfico ajustado, a velocidade média teórica a ser considerada passa a ser de $v = 0,2016m/s$.

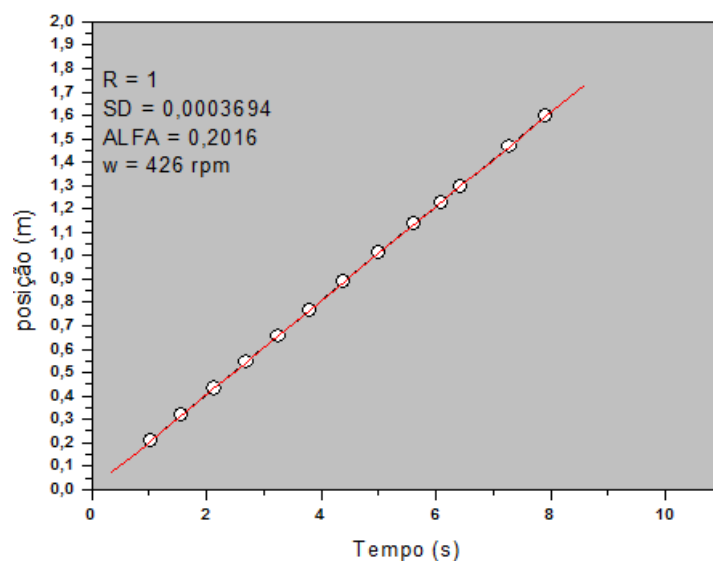


Figura 5.6: Gráfico Posição x Tempo teórico ($D_{t_n} \times t$) com velocidade angular de 426rpm.

Na figura 5.7 é apresentado o gráfico Posição x Tempo prático ($x \times t$), relativo aos experimentos com velocidade angular de $580rpm$, Observe que ALFA corresponde a tangente do ângulo de inclinação da reta, logo $ALFA = VELOCIDADE\ MÉDIA$. Sendo assim para o gráfico ajustado, a velocidade média a ser considerada passa a ser de $v = 0,10413m/s$.

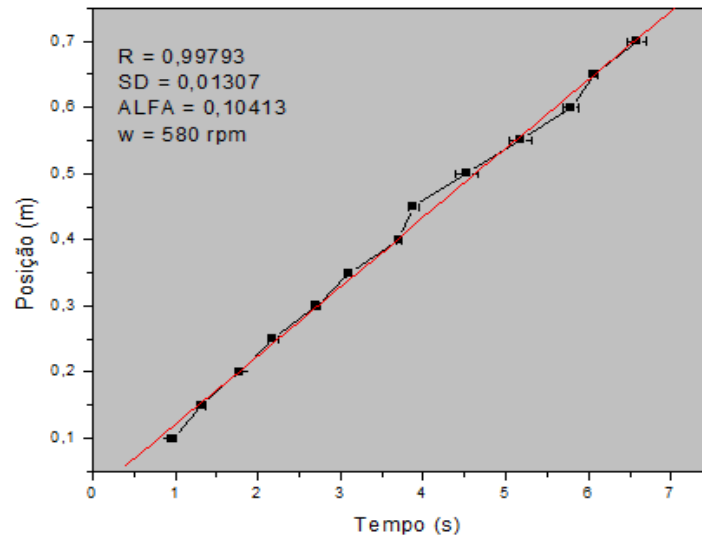


Figura 5.7: Gráfico Posição x Tempo prático ($x \times t$) com velocidade angular de $580rpm$.

Na figura 5.8 é apresentado o gráfico Posição x Tempo teórico sem considerar as perdas ($D_{t_n} \times t$), para a velocidade angular de $580rpm$, Observe que ALFA corresponde a tangente do ângulo de inclinação da reta, logo $ALFA = VELOCIDADE\ MÉDIA$. Sendo assim para o gráfico ajustado, a velocidade média teórica a ser considerada passa a ser de $v = 3,6428m/s$.

Na figura 5.9 é apresentado o gráfico Posição x Tempo prático ($x \times t$), relativo aos experimentos com velocidade angular de $720rpm$, Observe que ALFA corresponde a tangente do ângulo de inclinação da reta, logo $ALFA = VELOCIDADE\ MÉDIA$. Sendo assim para o gráfico ajustado, a velocidade média a ser considerada passa a ser de $v = 0,1655m/s$.

Na figura 5.10 é apresentado o gráfico Posição x Tempo teórico sem considerar as perdas ($D_{t_n} \times t$), para a velocidade angular de $580rpm$, $ALFA = VELOCIDADE\ MÉDIA$. Sendo assim para o gráfico ajustado, a velocidade média teórica a ser considerada passa a ser de $v = 0,34082m/s$.

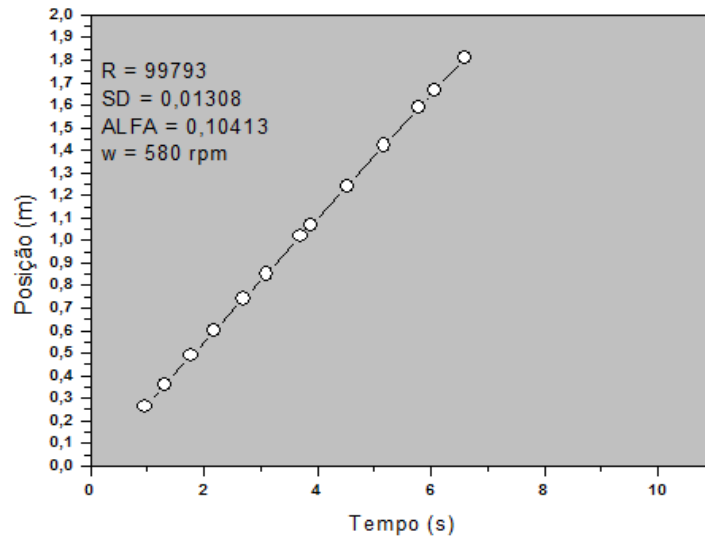


Figura 5.8: Gráfico Posição x Tempo teórico ($D_{t_n} \times t$) com velocidade angular de 580rpm.

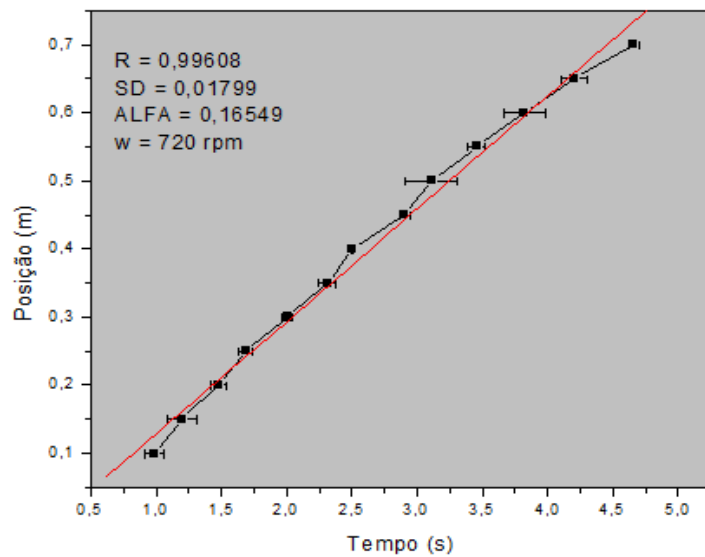


Figura 5.9: Gráfico Posição x Tempo prático ($x \times t$) com velocidade angular de 720rpm.

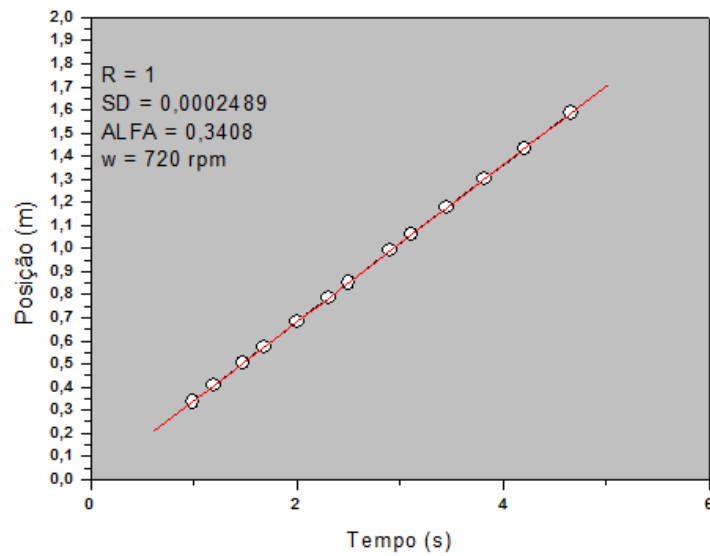


Figura 5.10: Gráfico Posição x Tempo teórico ($D_{t_n} \times t$) com velocidade angular de 720rpm.

Com base nos experimentos acima, vamos inserir na equação 3.24 do modelo teórico o coeficiente de ajuste ca , que considera as perdas ao longo do tempo. Para tanto, vamos dividir em grupos de rotações, cada grupo com seu coeficiente de ajuste correspondente, conforme abaixo:

- De 220 a 290rpm = Média entre as médias do dif de 220rpm e dif de 290rpm, logo $ca = 49$;
- Maior que 290 a 426rpm = Média entre as médias do dif de 290rpm e dif de 426rpm, logo $ca = 51$;
- Maior que 426 a 580rpm = Média entre as médias do dif de 426rpm e dif de 580rpm, logo $ca = 57$;
- Maior que 580 a 720rpm = Média entre as médias do dif de 580rpm e dif de 720rpm, logo $ca = 58$;

Com o intuito de comparar o deslocamento real x definido durante os experimentos com o esperado utilizando o modelo matemático, montamos as tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, onde são apresentados, com base na equação 3.25, os valores do deslocamento linear teórico ajustado D_{ta_n} para as rotações abordadas nesta dissertação.

Tabela 5.6: Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{tan} para $\omega = 220rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{tan}(m)$
0,10	2,385	2,173	2,467	2,131	2,289	$1,191 \times 10^{-2}$	0,044	0,122
0,15	3,068	2,802	3,000	2,877	3,918	$1,393 \times 10^{-2}$	0,051	0,208
0,20	3,739	3,875	3,751	3,918	3,821	$1,428 \times 10^{-2}$	0,052	0,203
0,25	4,482	4,853	4,951	4,656	4,736	$1,440 \times 10^{-2}$	0,053	0,252
0,30	5,305	5,202	5,288	5,075	5,218	$1,568 \times 10^{-2}$	0,057	0,277
0,35	6,292	6,420	6,630	6,938	6,570	$1,453 \times 10^{-2}$	0,053	0,349
0,40	7,662	7,600	7,802	8,001	7,766	$1,405 \times 10^{-2}$	0,052	0,412
0,45	9,751	9,445	9,571	9,287	9,514	$1,290 \times 10^{-2}$	0,047	0,505

Tabela 5.7: Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{tan} para $\omega = 290rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{tan}(m)$
0,10	1,363	1,358	1,375	1,396	1,373	$1,507 \times 10^{-2}$	0,073	0,096
0,15	2,013	1,996	1,996	1,942	1,987	$1,562 \times 10^{-2}$	0,076	0,139
0,20	2,776	2,787	2,641	2,653	2,714	$1,525 \times 10^{-2}$	0,074	0,190
0,25	3,569	3,409	3,424	3,421	3,463	$1,494 \times 10^{-2}$	0,072	0,242
0,30	4,498	4,485	4,516	4,493	4,498	$1,380 \times 10^{-2}$	0,067	0,315
0,35	4,907	4,892	4,863	4,889	4,888	$1,482 \times 10^{-2}$	0,072	0,342
0,40	5,517	5,416	5,463	5,491	5,472	$1,512 \times 10^{-2}$	0,073	0,383
0,45	6,171	6,185	6,287	6,276	6,230	$1,494 \times 10^{-2}$	0,072	0,436
0,50	6,792	6,803	6,842	6,792	6,807	$1,520 \times 10^{-2}$	0,073	0,477
0,55	7,420	7,489	7,512	7,652	7,518	$1,514 \times 10^{-2}$	0,073	0,526
0,60	8,172	8,284	8,171	8,026	8,163	$1,521 \times 10^{-2}$	0,074	0,571
0,65	8,759	8,759	8,892	8,883	8,823	$1,524 \times 10^{-2}$	0,074	0,618
0,70	9,673	9,972	9,865	9,852	9,796	$1,479 \times 10^{-2}$	0,071	0,686

Tabela 5.8: Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{ta_n} para $\omega = 426rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{ta_n}(m)$
0,10	1,038	1,059	1,035	1,059	1,043	$1,351 \times 10^{-2}$	0,096	0,103
0,15	1,532	1,522	1,630	1,597	1,570	$1,345 \times 10^{-2}$	0,096	0,155
0,20	2,105	2,090	2,181	2,182	2,140	$1,317 \times 10^{-2}$	0,093	0,211
0,25	2,778	2,720	2,668	2,600	2,692	$1,308 \times 10^{-2}$	0,093	0,266
0,30	3,286	3,200	3,263	3,264	3,253	$1,299 \times 10^{-2}$	0,092	0,321
0,35	3,743	3,757	3,821	3,902	3,806	$1,295 \times 10^{-2}$	0,092	0,376
0,40	4,437	4,344	4,419	4,401	4,400	$1,280 \times 10^{-2}$	0,091	0,435
0,45	4,953	5,046	4,981	5,074	5,014	$1,264 \times 10^{-2}$	0,090	0,495
0,50	5,672	5,509	5,627	5,703	5,628	$1,251 \times 10^{-2}$	0,089	0,556
0,55	6,184	6,022	5,876	6,272	6,089	$1,272 \times 10^{-2}$	0,090	0,602
0,60	6,398	6,395	6,460	6,454	6,427	$1,315 \times 10^{-2}$	0,093	0,635
0,65	7,364	7,129	7,299	7,334	7,282	$1,257 \times 10^{-2}$	0,089	0,719
0,70	7,808	7,881	7,965	7,999	7,913	$1,246 \times 10^{-2}$	0,088	0,782

Tabela 5.9: Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{ta_n} para $\omega = 580rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{ta_n}(m)$
0,10	0,915	0,920	0,999	1,016	0,963	$1,075 \times 10^{-2}$	0,104	0,114
0,15	1,278	1,295	1,300	1,388	1,315	$1,180 \times 10^{-2}$	0,114	0,155
0,20	1,742	1,732	1,778	1,852	1,776	$1,165 \times 10^{-2}$	0,113	0,210
0,25	2,275	2,155	2,143	2,147	2,180	$1,186 \times 10^{-2}$	0,115	0,257
0,30	2,692	2,700	2,652	2,763	2,702	$1,149 \times 10^{-2}$	0,111	0,319
0,35	3,046	3,100	3,111	3,139	3,099	$1,168 \times 10^{-2}$	0,113	0,366
0,40	3,734	3,720	3,699	3,673	3,707	$1,116 \times 10^{-2}$	0,108	0,438
0,45	3,813	3,850	3,902	3,966	3,883	$1,199 \times 10^{-2}$	0,116	0,458
0,50	4,726	4,455	4,431	4,471	4,521	$1,144 \times 10^{-2}$	0,111	0,534
0,55	5,394	5,112	5,105	5,108	5,180	$1,098 \times 10^{-2}$	0,106	0,611
0,60	5,887	5,850	5,726	5,684	5,787	$1,073 \times 10^{-2}$	0,104	0,683
0,65	6,096	6,100	6,050	6,035	6,070	$1,108 \times 10^{-2}$	0,107	0,717
0,70	6,692	6,651	6,428	6,604	6,594	$1,098 \times 10^{-2}$	0,106	0,778

Tabela 5.10: Resultados Experimentais, comparação entre x e D_{tan} para $\omega = 720rpm$.

$x(m)$	$t1(s)$	$t2(s)$	$t3(s)$	$t4(s)$	$\langle t \rangle (s)$	$D_p(m)$	$\bar{v}(m/s)$	$D_{tan}(m)$
0,10	1,048	1,010	1,009	0,881	0,987	$8,443 \times 10^{-3}$	0,101	0,141
0,15	1,357	1,205	1,100	1,125	1,197	$1,044 \times 10^{-2}$	0,125	0,171
0,20	1,568	1,449	1,449	1,455	1,480	$1,126 \times 10^{-2}$	0,135	0,212
0,25	1,759	1,701	1,652	1,633	1,686	$1,235 \times 10^{-2}$	0,148	0,241
0,30	2,053	2,010	2,008	1,946	2,004	$1,247 \times 10^{-2}$	0,150	0,287
0,35	2,394	2,328	2,278	2,250	2,313	$1,261 \times 10^{-2}$	0,151	0,331
0,40	2,491	2,502	2,499	2,510	2,501	$1,333 \times 10^{-2}$	0,160	0,358
0,45	2,961	2,890	2,900	2,868	2,905	$1,291 \times 10^{-2}$	0,155	0,416
0,50	3,300	2,835	3,201	3,105	3,110	$1,340 \times 10^{-2}$	0,161	0,445
0,55	3,555	3,420	3,415	3,434	3,456	$1,326 \times 10^{-2}$	0,159	0,495
0,60	3,668	3,708	3,899	4,010	3,821	$1,308 \times 10^{-2}$	0,157	0,547
0,65	4,333	4,230	4,150	4,107	4,205	$1,288 \times 10^{-2}$	0,155	0,602
0,70	4,694	4,604	4,651	4,691	4,660	$1,252 \times 10^{-2}$	0,150	0,667

Nas figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14, são apresentados os gráficos deslocamentos reais (x) definido durante os experimentos x deslocamento esperado (D_{tan}) expresso através da utilização do modelo matemático definido no projeto, conforme demonstrado nas tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10.

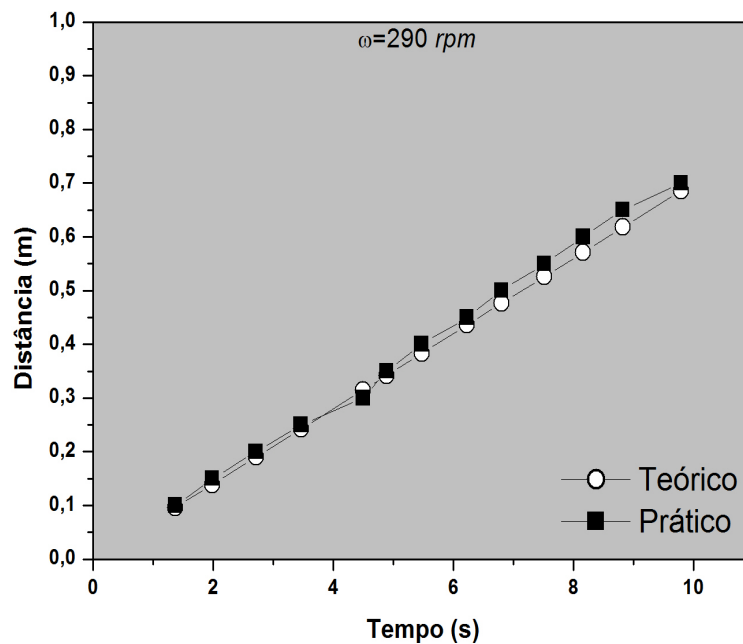


Figura 5.11: Gráfico Deslocamentos Real (x) definido durante os experimentos x Deslocamento Esperado (D_{tan}) definido utilizando-se o modelo matemático, com velocidade angular de $290rpm$.

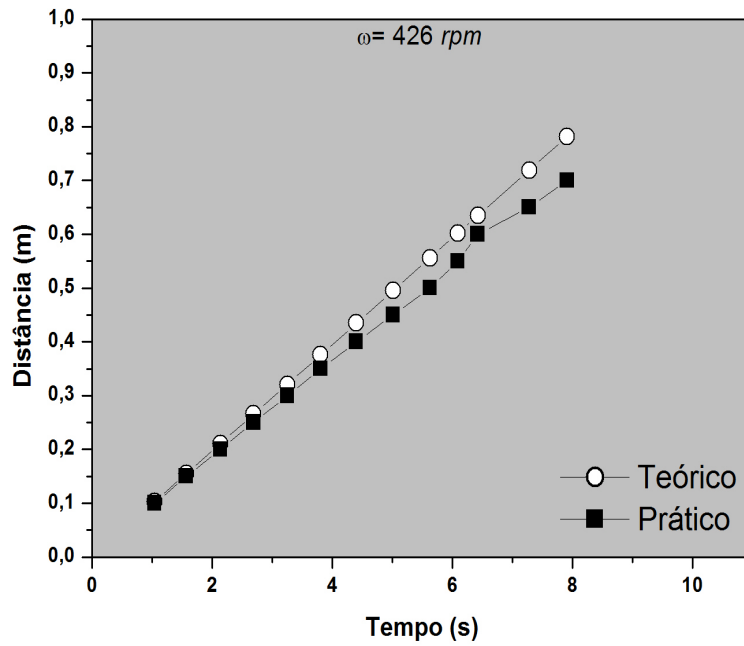


Figura 5.12: Gráfico Deslocamentos Real (x) definido durante os experimentos x Deslocamento Esperado (D_{ta_n}) definido utilizando-se o modelo matemático, com velocidade angular de 426 rpm .

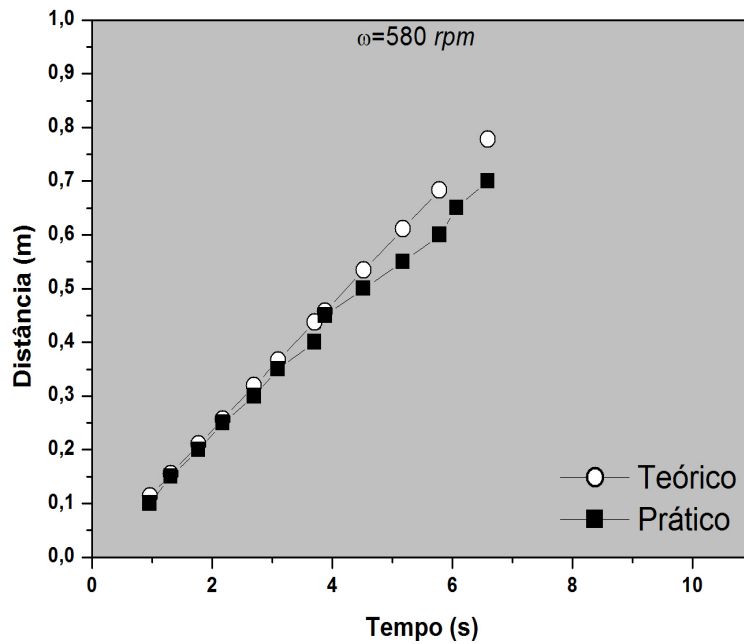


Figura 5.13: Gráfico Deslocamentos Real (x) definido durante os experimentos x Deslocamento Esperado (D_{ta_n}) definido utilizando-se o modelo matemático, com velocidade angular de 580 rpm .

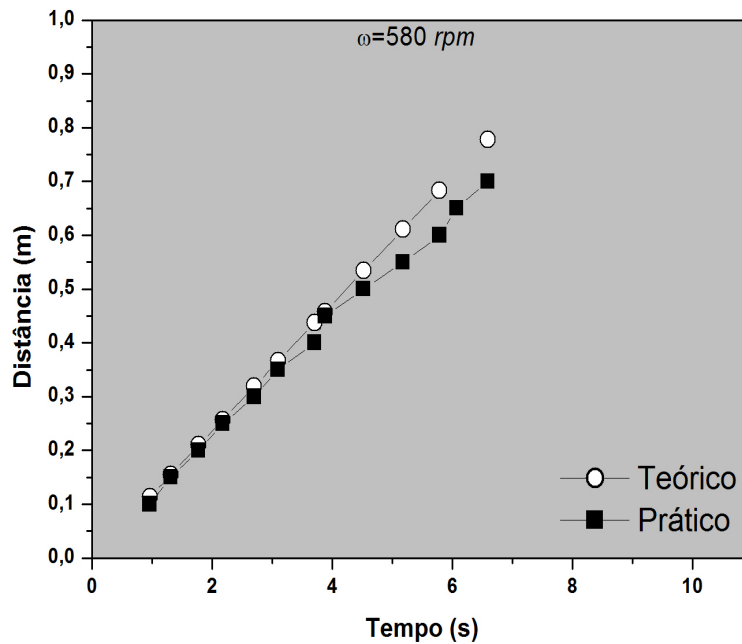


Figura 5.14: Gráfico Deslocamentos Real (x) definido durante os experimentos x Deslocamento Esperado (D_{ta_n}) definido utilizando-se o modelo matemático, com velocidade angular de $720rpm$.

Podemos fazer algumas observações com base nos resultados obtidos em laboratório:

- Podemos observar que o valor de D_{ta_n} nas tabelas, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, são bem próximos de seus respectivos valores de x nas tabelas, adotados nos experimentos práticos, logo podemos concluir, que para o protótipo em questão, a equação 3.25 retrata o deslocamento executado pelo protótipo e é aplicável para a estimativa e análise de parâmetros envolvidos no modelo matemático. ;
- Quanto maior a velocidade angular do propulsor, menor seu deslocamento por ciclo, porém maior o número de ciclos para o intervalo de tempo ;
- Observe que para deslocamentos superiores ao realizado em um período T , os gráficos elaborados das posições e ajustados se caracterizam como sendo um Diagrama Horário das Posições no movimento retilíneo uniforme (MRU);
- Observe que a relação entre o deslocamento teórico D_t e o deslocamento prático (D_p) é aceitável e coerente. O valor prático tem que ser obrigatoriamente menor que o teórico, porque nas considerações para a formulação do deslocamento teórico foram desconsiderados alguns fatores como: força de atrito, arraste do ar, entre outras,

então podemos considerar válida a dedução da equação 3.23, para o cálculo aproximado do deslocamento teórico de um ciclo para este modelo de propulsor;

- Também podemos salientar a relação força peso, onde três pequenas esferas de aço foram responsáveis por deslocar o conjunto inteiro pesando $1,2kg$, com velocidade média de $0,073m/s$;

Uma característica peculiar deste modelo de propulsor é o seu estilo de movimento intermitente com a presença constante de uma pequena vibração durante todo o seu funcionamento. Seu movimento é formado por um somatório de pequenos movimentos denominados ciclos (1 rotação completa do rotor). A cada ciclo a velocidade do propulsor sai do valor nulo $v = 0$ vai a um valor máximo $v = \textit{maximo}$ e retorna ao valor nulo $v = 0$, fechando um ciclo. Na figura 5.15 temos o esboço do gráfico Velocidade do Propulsor x Posição em Graus de Seu Rotor, demonstrando este comportamento.

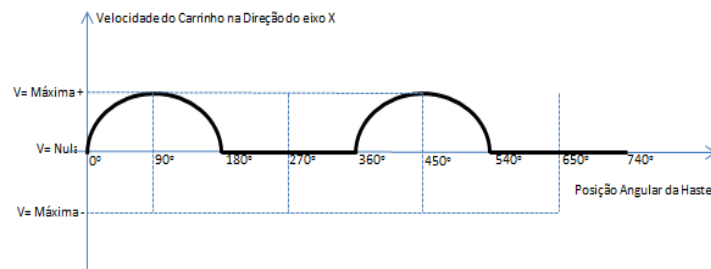


Figura 5.15: Esboço do gráfico Velocidade do Propulsor x Posição em Graus de Seu Rotor.

5.3 Conclusões e Perspectivas Futuras

A tecnologia mostrou-se viável, pois a resultante das forças são representativas em relação a massa do sistema como um todo, ou seja, o desempenho do propulsor obtido em laboratório, foi considerado satisfatório, pois com massas responsáveis pelo movimento representando apenas 5,2 % da massa total do propulsor, foram capazes de locomovê-lo durante os experimentos a uma velocidade média de $0,073m/s$. Porém, no intuito de termos a reprodutibilidade do processo, o primeiro protótipo não foi um caso de sucesso, como visto na seção 5.1, assim decidimos por elaborar o segundo protótipo, mais resistente e robusto. Durante a fase do projeto foram inseridos alguns parâmetro a mais e feito algumas melhorias sobre o projeto do anterior. Fomos para o laboratório e ao colocarmos o protótipo em funcionamento, percebemos que não se deslocava para nenhum lugar, ou seja, não funcionava como o esperado, provavelmente ocasionado pelas mudanças inseri-

das no projeto original. Diante deste fato tínhamos três caminhos a seguir: fazer outro protótipo, mudar o tema da dissertação, ou alterar a tecnologia do propulsor sem mudar o objetivo da dissertação. Optamos pela terceira opção, visto que para as duas primeiras o tempo restante para a conclusão da pesquisa não seria suficiente.

Optamos por mudar a tecnologia do propulsor, pois neste caso não seria necessário a confecção de um novo protótipo, podendo ser utilizado o mesmo protótipo, alterando-se apenas a disposição e o número de esfera em seu rotor, pois diferentemente da primeira tecnologia que trabalhava prioritariamente balanceada, esta trabalha permanentemente desbalanceada, ou seja, trabalha o tempo todo com uma massa desbalanceada, como vimos no capítulo 3. Outro fator muito importante, que também nos ajudou a fazer esta opção, foi o fato de que não estaríamos alterando o objetivo da dissertação, uma vez que continuamos com uma unidade móvel sendo movida por um propulsor por desbalanceamento de massas rotativas.

Uma característica marcante no comportamento do segundo dispositivo é o fato de possuir extremos marcantes no seu processo de funcionamento, no que se refere a limites de rotações, com pode ser observado durante os experimentos. A menor rotação de funcionamento que podemos observar, onde se conseguia manter uma regularidade na intensidade da rotação, foi em torno de 220 rpm; em rotações inferiores a esta, observou-se uma grande variação de rotações, até mesmo a parada repentina do sistema de rotação em alguns momentos, sendo impossível de se manter um deslocamento previsível ao longo do tempo. Já para rotações superiores a 720 rpm, observou-se a predominância do caos, a existência de muita vibração, ocasionando o deslocamento do protótipo para direções não desejáveis, e com trajetória aleatória (retas, curvas, circuito ovais ou mistos), não podendo ser caracterizado como um deslocamento controlado, intencional e programado.

Com relação ao primeiro protótipo, é pertinente um estudo mais aprofundado nas possíveis causas de sua instabilidade funcional, aprimorar a pesquisa nas regiões do salto da esfera e na da retomada do contato com a parede da carcaça, buscando potencializar as forças resultantes desejáveis e minimizar as indesejáveis. Já para o segundo protótipo é interessante um estudo na otimização estrutural do projeto focando na relação Peso x potência. Para ambos os casos, é de bom grado a construção de um novo protótipo.

Um trabalho de relevância é implementar um protótipo do propulsor por desbalanceamento de massas rotativas em uma unidade móvel aquática, ou seja, desenvolver uma pesquisa com o propulsor instalado em um barco protótipo ou um submersível protótipo. Como ponto de apoio externo pode-se fazer uso de uma conformação adequada no casco externo da unidade móvel, por exemplo, um veleiro para não andar para o lado, usa uma quilha sobre o casco, que por meio do atrito com a água impede que o barco siga esta direção indesejada; analogamente pode-se fazer uso de algo similar para a pesquisa.

Para a elaboração de novos protótipos é interessante:

- Não utilizar sistema de transmissão por correias e polias, pois durante os experimentos apresentaram desgastes prematuros, aquecimentos excessivos com respectivas perda de tração devido ao escorregamento, e como consequência final, o aparecimento indesejável de variações de rotações no funcionamento do propulsor ;
- Projetar o rotor de maneira que na região do salto, durante todo o seu percurso, este ao impulsionar a esfera, o seu contato com a mesma não ultrapasse o raio da esfera (centro geométrico), para não gerar uma componente normal durante o processo, que provavelmente anularia a atuação da força no lado oposto, fazendo com que o sistema se torne inoperante;
- Procurar amenizar ao máximo o peso do protótipo, com por exemplo, substituindo parafusos de aço por plásticos, e a utilização de encaixes quando possível, pode ser uma ótima saída, pois este impõem limitações desnecessária durante a execução dos experimentos.

Referências Bibliográficas

- AOKI, L. P. *Estudo do Efeito Magnetohidrodinâmico em um Eletrólito a Partir do Uso de um Dispositivo Enjetor Eletromagnético*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011.
- ARAÚJO, M. R. V. de. *Projeto, Simulação e Controle de Veículo Aéreo Não Tripulado Tail-Sitter*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2007.
- Jury Bronislavovich. *Method of converting the rotary motion of a solid body into the body's own linear motion using the 'directional imbalance' method, and a device for applying said method*. 1996. WO 96/12891, 02/05/1996.
- João Carlos Ferreira. *Gerador de Empuxo por Centrifugação*. 1995. PI 9304159-4 A, 07/10/1995.
- HALLIDAY, D. *Física 1*. Travessa do ouvidor, 11 - Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.
- HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. Décima Primeira Edição - Porto Alegre: Bookman., 2011.
- Jesus Angel Vila Munoz Alfredo Bruno Kolb. *Vorrichtung und Verfahren zum Erzeugen Einer Gerichteten Kraft aus Einr Drehbewegung*. 1998. WO 98/42982, 01/10/1998.
- LEMONS, N. A. *Mecânica Analítica*. Segunda edição - São Paulo: Editora Livraria da Física, 2007.
- LLANA, I. de la; VILA, J.; ARGUINCHONA, J. Naval propulsion system based on a rotary movement. *Journal of Maritime Research*, v. 6, n. 3, p. 3–14, 2009.
- MARTÍNEZ, I. de la L. *Nuevo Sistema de Propulsión Naval*. Dissertação (Doctoral) — Universidad del País Vasco EusKal HerriKo Unibertsitatea, 2011.
- B.Laszlo Matyas. *Propulsion Apparatus*. 1969. 04/790,008, january 9, 1969.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Física 1*. Quarta edição - São Paulo: Editora Bulcher, 2002, 2002.
- Wander Rodrigues Vieira. *Propulsor Centrifugo, Gerador de Movimentos Independentes Para Veiculos Aéreo Espacial*. 2000. 9900645-6 A, 22/08/2000.

Propulsão por Desbalanceamento de Massas Rotativas

Roosevelt de Carvalho Regis

Salvador, Novembro 2013.