



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m16c/2017/04.12.13.20-TDI

DESENVOLVIMENTO DE UMA BALANÇA DE EMPUXO PARA PROPULSORES ELÉTRICOS

Marcelo Renato Anselmo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, orientada pelos Drs. Rodrigo Intini Marques, e Gilberto Marrega Sandonato, aprovada em 30 de março de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGPDW34P/3NMFQ4P>>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial
(ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos
Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m16c/2017/04.12.13.20-TDI

DESENVOLVIMENTO DE UMA BALANÇA DE EMPUXO PARA PROPULSORES ELÉTRICOS

Marcelo Renato Anselmo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, orientada pelos Drs. Rodrigo Intini Marques, e Gilberto Marrega Sandonato, aprovada em 30 de março de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGPDW34P/3NMFQ4P>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Anselmo, Marcelo Renato.

An82d Desenvolvimento de uma balança de empuxo para propulsores elétricos / Marcelo Renato Anselmo. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxx + 145 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m16c/2017/04.12.13.20-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Rodrigo Intini Marques, e Gilberto Marrega Sandonato.

1. Balança de empuxo. 2. PPT. 3. DCE. 4. Impulso. 5. Empuxo.
I.Título.

CDU 629.7.031



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported License.

Aluno (a): **Marcelo Renato Anselmo**

"DESENVOLVIMENTO DE UMA BALANÇA DE EMPUXO PARA PROPULSORES ELÉTRICOS"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em

Engenharia e Tecnologia
Espaciais/Combustão e Propulsão

Dr. **Rodrigo Intini Marques**



Presidente / Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. **Gilberto Marrega Sandonato**



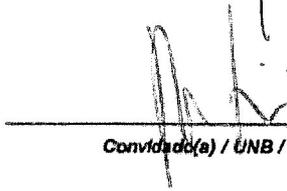
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. **Fernando de Souza Costa**



Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. **Paolo Gessini**



Convidado(a) / UNB / Brasília - DF

Este trabalho foi aprovado por:

() *maioria simples*

(x) *unanimidade*

São José dos Campos, 30 de março de 2017

“Quanto mais me aprofundo na Ciência mais me aproximo de Deus”.

ALBERT EINSTEIN

*A meus pais **Abílio** e **Maria Alice**, à minha irmã
Claudia e aos demais familiares.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço sobretudo a Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais, Abílio e Maria Alice por todo apoio que me deram durante os momentos difíceis.

Aos meus professores pelas disciplinas ministradas.

Ao meu coorientador Dr. Gilberto Marrega Sandonato, pesquisador do Laboratório Associado de Plasma do INPE pelo apoio técnico, pelo material e mão de obra cedidos gentilmente.

Aos técnicos mecânicos que fizeram todas as peças da balança de empuxo.

Ao meu orientador e amigo Dr. Rodrigo Intini Marques pelas ideias, compreensão, paciência e apoio durante todo esse trabalho.

Ao chefe do LCP, Dr. Ricardo Vieira e ao responsável pelo BTSA, MSc. Aguinaldo Martins Serra Júnior pelo apoio e empréstimo de equipamentos e materiais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa oferecida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo número 2016/05927-3 pelo apoio financeiro.

E a todos que ajudaram direta ou indiretamente e tornaram possível a conclusão desse trabalho.

RESUMO

Os testes de caracterização de propulsores buscam a obtenção de parâmetros de desempenho, tais como empuxo, impulso e impulso específico. Para isto, foi desenvolvida uma balança de empuxo para propulsores de plasma pulsado (*PPTs, Pulsed Plasma Thrusters*), com faixa de medição de impulso entre 14 e 79 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ e resolução mínima de 0,05 e máxima de 0,10 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$, necessária para a caracterização inequívoca destes propulsores elétricos. A técnica de medição direta, na qual o propulsor é montado sobre a balança de empuxo, é considerada a mais adequada e precisa para aplicações com *PPTs*, permitindo a medição de baixos valores de empuxo ($\sim 1 \mu\text{N}$). A balança de empuxo pode ter a configuração de um pêndulo de suspensão, pêndulo invertido ou pêndulo de torção. A configuração de pêndulo de torção foi utilizada devido às suas principais vantagens como relativa simplicidade de construção e custo reduzido. Além disso, essa configuração permite que a força de restauração da balança de empuxo seja independente da massa do propulsor, pois seu eixo de rotação é paralelo ao vetor da força gravitacional. O uso de pivôs de torção de baixa rigidez fez com que a balança pudesse ser mais compacta, com um braço de torção menor. Um dispositivo de calibração eletrostática foi projetado e construído para simular o empuxo de *PPTs*, calibrar a balança de empuxo e permitir futuros testes da balança com propulsores de plasma pulsado de dupla descarga (*DD-PPT, Double Discharge Pulsed Plasma Thrusters*), desenvolvidos no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. A balança projetada apresentou um erro máximo na medição de impulso de 10 %, abaixo da faixa de valores de 12 a 15 %, típicos para este tipo de balança de empuxo.

Palavras-chave: Balança de Empuxo. *PPT*. DCE. Impulso. Empuxo.

DEVELOPMENT OF A THRUST BALANCE FOR ELECTRIC THRUSTERS

ABSTRACT

The thrusters characterization tests seek to obtain the performance parameters such as thrust, impulse bit and specific impulse. For this, a thrust balance for pulsed plasma thrusters (PPTs) has been developed, able to measure impulse bit values between 14 and 79 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ with a minimum resolution of 0.05 and maximum of 0.10 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$, necessary for the unambiguous characterization of these electric thrusters. The direct measurement technique, in which the thruster is mounted on the thrust balance, is considered the most suitable and accurate for applications with PPTs, allowing the measurement of low thrust values ($\sim 1 \mu\text{N}$). The thrust balance can be configured as a hanging pendulum, inverted pendulum or torsional pendulum. The torsional pendulum configuration has as main advantages the relative construction simplicity and reduced cost. In addition, this configuration allows the thrust balance restoration force to be independent of the mass of the thruster, since its rotation axis is parallel to the gravitational force vector. The use of flexural pivots which have low stiffness makes the balance more compact, with a smaller torsional arm. An electrostatic calibration device was designed and built to simulate the thrust of PPTs, to calibrate the thrust balance and to allow forthcoming tests using double discharge pulsed plasma thrusters developed in the Associated Laboratory of Combustion and Propulsion of the Brazilian National Institute for Space Research. The maximum impulse bit measurement error provided by the balance designed was 10 %, lower than the value range of 12 to 15 %, typical for this type of thrust balance.

Keywords: Thrust balance. PPT. DCE. Impulse bit. Thrust.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 <i>AAU-CubeSat</i> - <i>CubeSat</i> alemão lançado em 2003.	3
1.2 Satélite Brasileiro SCD-1.	4
1.3 <i>CBERS-3</i> (“ <i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i> ”).	5
1.4 Satélite Amazônia-1.	5
1.5 Plataforma Multi-Missão (PMM).	6
1.6 Nanosatélite científico NanosatC-BR1.	6
1.7 <i>Cubesat</i> AESP-14.	7
1.8 <i>Cubesat</i> SERPENS.	7
1.9 Configuração básica de um propulsor de plasma pulsado (<i>PPT</i>), a densidade de corrente elétrica (\vec{j}), o campo magnético auto-induzido (\vec{B}) e a força de <i>Lorentz</i> ($\vec{j} \times \vec{B}$).	13
1.10 Impulso por pulso de diferentes <i>PPTs</i> de acordo com a energia utilizada pelo propulsor.	17
1.11 Configurações mais comuns de pêndulos para balanças de empuxo.	19
1.12 Exemplo de um pêndulo de torção com barra.	21
1.13 Vista superior do pêndulo de torção com barra.	22
1.14 Deslocamento $x(t)$ em função do tempo de um oscilador harmônico amortecido para o caso onde $(c/2m)^2 < (k/m)$ (amortecimento sub-crítico).	26
1.15 Campo elétrico de um capacitor de placas planas e paralelas.	31
2.1 Balança de empuxo configurada como um pêndulo de torção.	34
2.2 Balança de empuxo com o <i>PPT</i> a ser testado, seu contrapeso e os eletrodos do DCE.	35
2.3 Pivôs de torção da série 5000 da <i>Riverhawk Company</i>	36
2.4 Deflexão interna do pivô de torção da série 5000 da <i>Riverhawk Company</i>	37
2.5 Vista superior do braço da balança de empuxo com o sensor de deslocamento (fora de escala).	39
2.6 Impulso máximo do <i>PPT</i> em função da sua massa para diferentes valores de constante elástica de torção (κ_i) da balança de empuxo.	41
2.7 Curvas da tensão de saída em função da distância entre o alvo e o sensor óptico de deslocamento modelo D63 (número de série 2904 <i>Tip</i> 4130) da <i>Philtec Inc.</i>	45
2.8 Componentes do empuxo e ângulo de desalinhamento em relação ao braço da balança	46
2.9 Discos (eletrodos) do DCE.	48

2.10	Curva ideal da calibração do DCE.	49
2.11	Eletrodos sobre a balança analítica de precisão para calibração do DCE.	50
2.12	Eletrodos do DCE montados na balança de empuxo para aplicação da força.	51
2.13	Curvas ideais das forças eletrostáticas para $D_E = 1$ mm e $D_E = 0,99$ mm.	52
2.14	Montagem da balança de empuxo: principais elementos.	54
2.15	Base de fixação do DCE e do sensor de deslocamento.	55
3.1	Vista superior do braço da balança de empuxo deslocado pelo impulso do <i>PPT</i> (fora de escala).	58
3.2	Curva de calibração para o sensor óptico de deslocamento modelo D63- B(Bv2)C1E3 número de série 2904 <i>Tip</i> 4130 da <i>Philtec Inc.</i>	64
4.1	Osciloscópio digital modelo TDS5034B da <i>TEKTRONIX</i> (<i>TEKTRONIX</i> <i>INC.</i> , 2005) utilizado nos experimentos com a balança de empuxo.	68
4.2	Balança analítica de precisão da marca <i>Shimadzu</i> modelo AUY220.	69
4.3	Paquímetro digital marca <i>Mitutoyo</i> modelo 500-144B com resolução de 0,01 mm.	70
4.4	Eletrodos de alumínio do DCE.	70
4.5	Eletrodo menor do DCE com seu anel de guarda.	71
4.6	Fonte de tensão marca <i>Keithley Instruments, Inc.</i> modelo 6517A com tensão máxima de saída de 1000 VDC.	71
4.7	Montagem dos eletrodos do DCE na balança analítica de precisão.	72
4.8	Curvas de calibração experimental do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.	76
4.9	Curvas de calibração experimental do DCE linearizadas, para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.	77
4.10	Curvas teóricas da calibração do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.	78
4.11	Curvas teóricas de calibração do DCE, linearizadas para $D_E =$ $1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.	79
4.12	Comparação entre a calibração do DCE teórica e experimental para $D_E =$ $1,00 \pm 0,01$ mm.	81
4.13	Comparação entre a calibração do DCE teórica e experimental para $D_E =$ $0,99 \pm 0,01$ mm.	82
4.14	Calibração teórica e experimental do DCE linearizadas, para $D_E =$ $1,00 \pm 0,01$ mm.	82
4.15	Calibração teórica e experimental do DCE linearizadas, para $D_E =$ $0,99 \pm 0,01$ mm.	83
4.16	Micrômetro marca <i>Mitutoyo</i> com resolução de 10 μ m.	83

4.17	Sensor óptico montado na base de medições da balança de empuxo e seu disco refletivo (referência) no braço da balança.	84
4.18	Sinal de tensão do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital) com a condição de paralelismo satisfeita.	85
4.19	Sinal de saída máximo do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital). 86	
4.20	Sinal de tensão do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital) posicionado no centro da região linear de operação.	87
4.21	Dispositivo de calibração eletrostática montado na base de medições da balança de empuxo.	88
4.22	Balança de empuxo pronta para testes.	89
4.23	Câmara de vácuo.	90
4.24	<i>FFT</i> do sinal de tensão do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital) para J'_b	93
4.25	Gráfico para determinação experimental do momento de inércia (J'_b) e da constante elástica de torção (κ).	95
4.26	Gráfico para determinação experimental do novo momento de inércia (J''_b) e da nova constante elástica de torção (κ').	97
4.27	Comparação dos momentos de inércia J'_b e J''_b , e das constantes elásticas de torção κ e κ' , teóricos e experimentais da balança de empuxo.	99
4.28	Valores médio e máximo de tensão da saída do sensor óptico (para o cálculo de Δx_{max}) medido pelo canal #1 osciloscópio digital para J'_b . . .	103
4.29	Tensão de saída do sensor (canal #1 do osciloscópio, em amarelo) e a tensão aplicada ao DCE durante o tempo Δt (canal #2, em azul) para J'_b . 104	
4.30	Tensão aplicada no DCE (em detalhe), que produz uma força (F_E) durante o tempo Δt , gerando o impulso para J'_b	105
4.31	Tensão do sensor (V) em função do tempo (s) para o momento de inércia J_1 e tempo de relaxação $t_{R1} \approx 100$ (s).	107
4.32	Tensão do sensor (V) em função do tempo (s) para o momento de inércia J_2 e tempo de relaxação $t_{R2} \gg 100$ (s).	108
4.33	Decaimento exponencial da tensão de saída do sensor óptico ($U(t)$) ao longo do tempo devido ao coeficiente de atrito (λ) da balança de empuxo. 109	
4.34	Tensão máxima $V1$ (U_{max}) e tensão $V2$ ($U(t)$) em um instante de tempo t_2 , escolhido aleatoriamente para a determinação do coeficiente de atrito λ_1 para um momento de inércia J_1	110
4.35	Decaimento exponencial experimental da tensão do sensor óptico $U(t)$ em função do tempo, devido ao coeficiente de atrito λ_1 da balança de empuxo para o momento de inércia J_1	111

4.36	Tensão máxima $V1 (U_{max})$ e tensão $V2 (U(t))$ em um instante de tempo t_2 , escolhido aleatoriamente para a determinação do coeficiente de atrito λ_2 para um momento de inércia J_2	112
4.37	Decaimento exponencial experimental da tensão do sensor óptico $U(t)$ em função do tempo, devido ao novo coeficiente de atrito λ_2 da balança de empuxo para o momento de inércia $J_2 > J_1$	113
4.38	Impulso máximo teórico e experimental possível de ser medido pela balança de empuxo (com J'_b) em função da massa do <i>PPT</i> e a frequência de oscilação da balança.	116
4.39	Tensão de saída do sensor (canal #1, em amarelo) e a tensão aplicada ao DCE durante o tempo Δt (canal #2, em azul) para J''_b	119
4.40	Valores médio e máximo de tensão da saída do sensor óptico em detalhe (para o cálculo de Δx_{max}), com J''_b	120
4.41	Tensão aplicada ao DCE (em detalhe), que produz uma força (F_E) durante o tempo Δt , gerando o impulso para J''_b	121
4.42	<i>FFT</i> do sinal de tensão do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital) para J''_b	122
4.43	Impulso máximo teórico e experimental possível de ser medido pela balança de empuxo (com J''_b) em função da massa do <i>PPT</i> e a frequência de oscilação da balança.	125
4.44	Tensão na saída do sensor óptico (canal #1, em amarelo) e tensão aplicada ao DCE (canal #2, em azul), para J'_b e $m_{PPT} = 111,0490 \pm 0,0004$ g.	129
4.45	Força de empuxo em função do deslocamento linear do braço da balança, para J'_b e $m_{PPT} = 111,0490 \pm 0,0004$ g.	130

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Tipos de satélites e suas finalidades.	1
1.2 Classificação dos satélites artificiais em relação à sua massa.	2
1.3 Potência relativa dos propulsores para manobras orbitais e de atitude.	9
1.4 Categorias da Propulsão Elétrica.	10
1.5 Alguns propulsores elétricos e seus típicos parâmetros de desempenho.	11
1.6 Testes de veículos espaciais realizados com <i>PPTs</i>	12
1.7 Características dos <i>PPTs</i> e suas vantagens.	14
1.8 <i>Cubesats</i> e o aumento percentual da sua vida útil em diferentes órbitas com o uso do propulsor de satélite <i>PPTCUP</i>	15
1.9 Vantagens e desvantagens das configurações mais comuns de balanças de empuxo para propulsores elétricos.	20
2.1 Parâmetros dos pivôs de torção da série 5000 da <i>Riverhawk Company</i>	38
2.2 Valores dos coeficientes escolhidos para a balança de empuxo em desenvolvimento, que foram utilizados na Equação 2.5 para o gráfico da Figura 2.6.	42
2.3 Modelos D de sensor óptico da <i>Philtex Inc.</i> e suas características.	43
2.4 Valores dos coeficientes utilizados na Equação 2.7 para a curva da Figura 2.10.	49
3.1 Coeficientes utilizados na Equação 3.6 para determinação do impulso (I_{bit}) do <i>PPT</i>	59
3.2 Pesos-padrão que serão utilizados para a curva experimental do momento de inércia do braço da balança de empuxo.	61
3.3 Resumo dos métodos de obtenção dos parâmetros da equação 3.6 para o cálculo do impulso (I_{bit}), suas incertezas e instrumentos utilizados para realizar as medidas.	65
4.1 Escalas do osciloscópio digital modelo TDS5034B da <i>TEKTRONIX</i> , suas resoluções e incertezas.	67
4.2 Equipamentos e dispositivos utilizados para a curva de calibração experimental do DCE.	68
4.3 Medidas realizadas para obtenção das curvas de calibração experimentais do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm no local do experimento.	74

4.4	Medidas da força exercida pelos eletrodos em função da tensão aplicada entre eles (pontos da curva de calibração experimental do DCE) para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.	75
4.5	Valores dos coeficientes utilizados na Equação 2.7 para a curva de calibração teórica do DCE da Figura 4.10.	78
4.6	Erro relativo percentual (ERP_F) entre a força teórica e experimental, para a calibração do DCE linearizadas (para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm).	81
4.7	Valores de tensão de saída do sensor óptico para seus limites de distância da região linear de operação obtidas pela Equação 4.10.	87
4.8	Pesos-padrão combinados para obtenção do momento de inércia (J'_b) e da constante elástica de torção (κ) experimentais.	91
4.9	Valores de J_P e de f_{nat} obtidos para a determinação da curva linear $J_P(2\pi f_{nat})^2 = J'_b \cdot (2\pi f_{nat})^2 + \kappa$	92
4.10	Pontos para se obter graficamente os valores do momento de inércia J'_b e da constante elástica de torção κ	94
4.11	Valores teóricos e experimentais do momento de inércia J'_b e da constante elástica de torção κ , e o erro relativo percentual entre eles.	95
4.12	Pontos para se obter graficamente os valores de J''_b e κ' , devido à redução da distância entre as massas presas ao braço da balança e o eixo de rotação.	96
4.13	Valores teóricos e experimentais do novo momento de inércia (J''_b) e da nova constante elástica de torção (κ') e o erro relativo percentual entre eles.	97
4.14	Tensão da fonte (U_E) e a respectiva força eletrostática (F_E), produzida pelo DCE com esta tensão, obtida através da calibração linearizada do DCE, para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e J'_b	101
4.15	Tensão de saída do sensor óptico (U_i), distância do braço da balança de empuxo (x_i) e a variação Δx_{max} para J'_b	102
4.16	Comparação entre os impulsos aplicados pelo DCE e os medidos pela balança de empuxo com $r_T = r_{sens} = 0,2670 \pm 0,0005$ m e J'_b	106
4.17	Momento de inércia (J), sua equivalência à massa do <i>PPT</i> (m_{PPT}) e o impulso máximo medido ($I_{bit_{max}}$) para J'_b	114
4.18	Coefficiente angular (a) e o impulso máximo ($I_{bit_{max}}$) calculados para $\Delta x = 10 \mu\text{m}$ com J'_b	115
4.19	Valores dos coeficientes utilizados na Equação 2.5 para o gráfico da Figura 4.38.	117

4.20	Tensão da fonte (U_E) e sua respectiva força (F_E), produzida pelo DCE e obtida da calibração linearizada do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e J_b''	118
4.21	Tensão de saída do sensor óptico (U_i), sua distância correspondente do braço da balança (x_i) e a variação Δx_{max} para J_b''	119
4.22	Comparação entre os impulsos aplicados pelo DCE e os medidos pela balança de empuxo com $r_T = r_{sens} = 0,2460 \pm 0,0005$ m e J_b''	123
4.23	Momento de inércia (J), sua equivalência à massa do <i>PPT</i> (m_{PPT}) e o impulso máximo medido ($I_{bit_{max}}$) para J_b''	123
4.24	Coefficiente angular (a) e o impulso máximo ($I_{bit_{max}}$) calculados para $\Delta x = 10 \mu\text{m}$ com J_b''	124
4.25	Valores dos coeficientes utilizados na Equação 2.5 para o gráfico da Figura 4.43.	126
4.26	Coefficientes angulares (a) e as resoluções para J_b' e κ	127
4.27	Coefficientes angulares (a) e as resoluções para J_b'' e κ'	127
4.28	Resultados da calibração estática obtida para J_b' e $m_{PPT} = 111,0490 \pm 0,0004$ g.	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB	– Agência Espacial Brasileira
AMAS	– Anomalia Magnética do Atlântico Sul
AWFI	– Advanced Wide Field Imager
CBERS	– China-Brazil Earth Resources Satellite
DCE	– Dispositivo de Calibração Eletrostática
DD-PPT	– Double Discharge Pulsed Plasma Thruster
DETER	– Detecção em Tempo Real
Equars	– Equatorial Atmosphere Research Satellite
FEEP	– Field Emission Electric Propulsion
FFT	– Fast Fourier Transform
GPM-Br	– Global Precipitation Measurement
GPS	– Global System Navigation
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	– Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISS	– International Space Station
JEM	– Japanese Experiment Module
J-SSOD	– JEM Small Satellite Orbital Deployer
LAMAT	– Laboratório de Materiais
LCP	– Laboratório Associado de Combustão e Propulsão
MERTS	– Micropound Extended Range Thrust Stand
Mirax	– Monitor e Imageador de Raios X
NIT	– Núcleo de Inovação Tecnológico Mantiqueira
NNS	– Navy Navigation Satellites
PMM	– Plataforma Multimissão
PNAE	– Programa Nacional de Atividades Espaciais
PPT	– Pulsed Plasma Thruster
PPTCUP	– Pulsed Plasma Thruster for CubeSat Propulsion
PTFE	– Politetrafluoretileno
SCD	– Satélite de Coleta de Dados
Serpens	– Sistema Espacial para Realização de Pesquisa e Experimentos com Nanossatélites
SI	– Sistema Internacional de Unidades
SPQ	– Sociedade Portuguesa de Química
TIP	– Transit Improvement Program
TTL	– Transistor-transistor logic

LISTA DE SÍMBOLOS

a	–	ano
a	–	coeficiente angular
A	–	constante
A'	–	constante
A_0	–	área da placa do capacitor
A_E	–	área do eletrodo menor
b	–	coeficiente linear
B	–	campo magnético
c	–	coeficiente de atrito
d	–	dia
dA	–	elemento de área
D_E	–	distância entre os eletrodos
E	–	campo elétrico
ERP_F	–	erro relativo percentual da força
f_0	–	frequência de oscilação do pêndulo de torção com amortecimento
f_1	–	frequência de oscilação do sistema massa-mola com amortecimento
f_n	–	frequência natural do sistema massa-mola sem amortecimento
f_{nt}	–	frequência natural do pêndulo de torção sem amortecimento
f_{nat}	–	frequência natural da balança de empuxo
F	–	força
F_c	–	força eletrostática entre as placas do capacitor
F_e	–	força eletrostática
F_E	–	força elétrica entre os eletrodos
$F_{E(+)}$	–	aumento da força eletrostática
g	–	aceleração gravitacional local ($g = 9,7859395 \text{ m/s}^2$)
g_0	–	aceleração gravitacional ao nível do mar ($g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$)
I	–	impulso total
I_{bit}	–	impulso por pulso
I_i	–	impulso aplicado no instante t_i
I_{max}	–	impulso máximo
I_{sp}	–	impulso específico
j	–	densidade de corrente
J	–	momento de inércia
J_b	–	momento de inércia do braço da balança de empuxo
J'_b	–	momento de inércia da configuração 1
J''_b	–	momento de inércia da configuração 2
J_e	–	momento de inércia do eletrodo
J_p	–	momento de inércia do peso
J_s	–	momento de inércia do suporte
J_C	–	momento de inércia do conjunto

J_{CP}	–	momento de inércia do contrapeso
J_P	–	momento de inércia dos pesos-padrão
J_{PPT}	–	momento de inércia do <i>PPT</i>
J_T	–	momento de inércia total
k	–	constante elástica da mola
l	–	comprimento da haste
L	–	momento angular
m	–	mês
m	–	massa
m_f	–	massa final
m_i	–	massa inicial
m_A	–	massa do bloco A
m_B	–	massa do bloco B
m_{CP}	–	massa do contrapeso
m_{PPT}	–	massa do <i>PPT</i>
p	–	momento linear
q	–	carga elétrica
r	–	posição (distância)
r_{sens}	–	distância do sensor em relação ao eixo de rotação
r_A	–	distância do bloco A em relação ao eixo de rotação
r_B	–	distância do bloco B em relação ao eixo de rotação
r_{CP}	–	distância do contrapeso ao eixo de rotação
r_F	–	distância da força F em relação ao eixo de rotação
r_{PPT}	–	distância do <i>PPT</i> ao eixo de rotação
r_T	–	distância da força de empuxo T em relação ao eixo de rotação
R	–	raio do movimento circular
t_{off}	–	instante de tempo em que a força de empuxo deixa de agir
t_{on}	–	tempo inicial da descarga do capacitor
t_R	–	tempo de relaxação da balança
T	–	força de empuxo
U	–	diferença de potencial (d.d.p.)
U_E	–	tensão da fonte
v	–	velocidade linear
v_i	–	velocidade imediatamente após o impulso
x	–	deslocamento linear
x_i	–	distância linear do braço da balança de empuxo em relação ao sensor óptico
β	–	constante exata
\bar{x}	–	valor médio da variável x
α	–	ângulo de deslocamento
$\ddot{\alpha}$	–	derivada de segunda ordem em relação ao tempo do deslocamento angular
δa	–	incerteza do coeficiente angular
δb	–	incerteza do coeficiente linear

δf_{nat}	–	incerteza da frequência natural da balança de empuxo
δm_{CP}	–	incerteza da massa do contrapeso
δm_{PPT}	–	incerteza da massa do <i>PPT</i>
δr_{sens}	–	incerteza da distância do sensor ao eixo de rotação
δr_{CP}	–	incerteza da distância do contrapeso ao eixo de rotação
δr_{PPT}	–	incerteza da distância do <i>PPT</i> ao eixo de rotação
δr_T	–	incerteza da distância do ponto de aplicação do empuxo ao eixo de rotação
δt	–	intervalo de tempo
δx	–	incerteza da medição da variável x
δx_i	–	incerteza da distância linear do braço em relação ao sensor óptico
δA_E	–	incerteza da área do eletrodo menor
δD_E	–	incerteza da distância entre os eletrodos
δERP_F	–	incerteza do erro relativo percentual da força
δF_E	–	incerteza da força elétrica entre os eletrodos
δJ	–	incerteza do momento de inércia
$\delta J'_b$	–	incerteza do momento de inércia da configuração 1
$\delta J''_b$	–	incerteza do momento de inércia da configuração 2
$\delta \kappa$	–	incerteza da constante elástica de torção da configuração 1
$\delta \kappa'$	–	incerteza da constante elástica de torção da configuração 2
$\delta \Delta t$	–	incerteza da largura do pulso
$\delta \Delta x$	–	incerteza do deslocamento linear
Δt	–	largura do pulso
Δx	–	variação do deslocamento linear
ΔV	–	variação total da velocidade do veículo espacial
ϵ_0	–	constante de permissividade do vácuo ($8,8541878176... \times 10^{-12}$ F/m)
ϵ_r	–	constante de permissividade relativa do ar (1,00059)
φ	–	ângulo de defasagem
Φ	–	fluxo de campo elétrico
κ	–	constante elástica de torção
λ	–	coeficiente de amortecimento
σ_x	–	desvio padrão da variável x
τ_r	–	torque restaurador
τ_A	–	torque de amortecimento
τ_R	–	torque resultante
τ_F	–	torque devido à força F
ω	–	velocidade angular
ω_0	–	velocidade angular do pêndulo de torção com amortecimento
ω_1	–	velocidade angular do sistema massa-mola com amortecimento
ω_i	–	velocidade angular imediatamente após o impulso
ω_n	–	velocidade angular do sistema massa-mola sem amortecimento
ω_{nt}	–	velocidade angular natural do pêndulo de torção sem amortecimento

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Satélites artificiais	1
1.1.1 <i>CubeSats</i>	2
1.1.2 Os satélites brasileiros	3
1.2 Propulsores de satélites	8
1.3 Propulsores elétricos	9
1.3.1 Propulsores de Plasma Pulsado - <i>PPTs</i>	11
1.4 Motivação e objetivo do trabalho	15
1.5 A medição de empuxo	18
1.6 O pêndulo de torção	19
1.6.1 Dinâmica do pêndulo de torção	21
1.7 Força eletrostática para um capacitor de placas paralelas	29
2 A BALANÇA DE EMPUXO	33
2.1 Descrição	33
2.2 Os pivôs de torção	35
2.3 O sensor de deslocamento linear - sensor óptico	42
2.4 Suportes para apoio do <i>PPT</i> e do contrapeso	46
2.5 Dispositivo de Calibração Eletrostática - DCE	46
2.6 Montagem da balança de empuxo	53
3 METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DO IMPULSO	57
3.1 Momento de inércia do conjunto	59
3.2 Frequência natural da balança de empuxo	62
3.3 Deslocamento linear do braço da balança de empuxo	63
3.4 Distâncias em relação ao eixo de rotação.	64
3.5 Resumo dos métodos utilizados para o cálculo do impulso.	64
4 EXPERIMENTOS	67
4.1 Curva de calibração do DCE	68
4.2 Montagem e ajustes do sensor de deslocamento - sensor óptico	84
4.3 Montagem e ajustes do DCE na balança de empuxo	88
4.4 Testes com a balança de empuxo	89

4.4.1	Ensaio para medição do momento de inércia e da constante elástica de torção da balança de empuxo	90
4.4.1.1	Determinação de J'_b e κ	91
4.4.1.2	Determinação de J''_b e κ'	96
4.4.2	Ensaio para medição do impulso - I_{bit}	99
4.4.2.1	Medição do impulso para a configuração da balança com J'_b e κ . . .	100
4.4.2.2	Medição do impulso para a nova configuração da balança com J''_b e κ'	117
4.5	Resolução da balança de empuxo	126
4.5.1	Resolução da balança para J'_b e κ	126
4.5.2	Resolução da balança para J''_b e κ'	127
4.6	Calibração estática	127
5	CONCLUSÃO	131
6	TRABALHOS FUTUROS	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

1 INTRODUÇÃO

1.1 Satélites artificiais

A construção e o lançamento de satélites artificiais começou na década de 1950 com o início dos programas espaciais americano e soviético. Os soviéticos foram os primeiros a colocar um satélite artificial em órbita ao redor da Terra (o *Sputnik I*) em 4 de outubro de 1957 (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 1999a). O termo “satélite artificial” pode ser definido como sendo um sistema modular, construído pelo homem, que pode orbitar a Terra ou algum outro planeta e, em geral, manter velocidade e altitude constantes (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 1999b). No entanto, neste trabalho se usará o termo satélite para designar satélites artificiais. A Tabela 1.1 apresenta alguns tipos de satélites e suas finalidades.

Tabela 1.1 - Tipos de satélites e suas finalidades.

Tipo de satélite	Finalidade
Comunicação ¹	Distribuir sinais de telefonia, internet e televisão, utilizando em sua maioria a órbita geoestacionária (equatorial).
Navegação	Permitir que receptores terrestres obtenham sua localização através dos sinais de uma constelação de 24 satélites ao redor da Terra em altitude aproximada de 20.000 km, formando o <i>GPS</i> (do inglês “ <i>Global System Navigation</i> ”).
Meteorológico ²	Monitorar o tempo e o clima da Terra e coletar informações ambientais.
Militar ¹	Identificar alvos camuflados ou no escuro e fotografar territórios com grande precisão utilizando câmeras infravermelho.
Exploração do Universo ³	Permitir a observação do céu através do uso de grandes telescópios. O <i>Hubble</i> é atualmente o telescópio mais famoso acoplado a um satélite.
Observação da Terra ⁴	Monitorar o território com câmeras registrando imagens de diferentes resoluções espaciais e comprimentos de onda.

Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 1999b).

Os satélites podem ser classificados de acordo com a sua massa (m), conforme mostra a Tabela 1.2 (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2011a).

Tabela 1.2 - Classificação dos satélites artificiais em relação à sua massa.

Classificação	Massa
Grandes satélites	$m > 1000$ kg
Satélites médios	$500 < m < 1000$ kg
Mini satélites	$100 < m < 500$ kg
Micro satélites	$10 < m < 100$ kg
Nano satélites	$1 < m < 10$ kg
Pico satélites	$0,1 < m < 1$ kg
Fento satélites	$m < 100$ g

Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2011a).

1.1.1 *CubeSats*

CubeSat, acrônimo em inglês de *Cube* - Cubo e *Sat* - Satélite, é um cubo de 100 mm de aresta (1U) e massa de aproximadamente 1,33 kg, que possui a missão principal de permitir que pequenas cargas úteis tenham acesso ao espaço para a realização de pesquisas espaciais e comunicação radioamadora. Seu projeto teve início em 1999 com a colaboração de professores da Universidade Estadual Politécnica da Califórnia (*Cal Poly*) e do Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Espaciais da Universidade de *Stanford* (acrônimo em inglês *SSDL*). O objetivo do projeto era promover uma padronização para a criação de pico satélites, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento e também melhorar sua acessibilidade ao espaço, suportando frequentes lançamentos. Atualmente o “Projeto *CubeSat*” é uma colaboração internacional entre mais de 100 universidades, escolas e empresas privadas que desenvolvem pico satélites para fins científicos, governamentais e privados (CUBESAT, 2015).

Os primeiros *CubeSats* lançados ao espaço, em 30 de junho de 2003, foram os *CubeSats* alemães - *AAU-CubeSat* e *DTUSat*; os japoneses *CubeSat XI-IV* e *CUTE-1*, e também o *CubeSat* americano *QuakeSat* e o canadense *CANX-1* (CUBESAT, 2015).

¹SGDC, Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicação, a ser lançado em 2017.

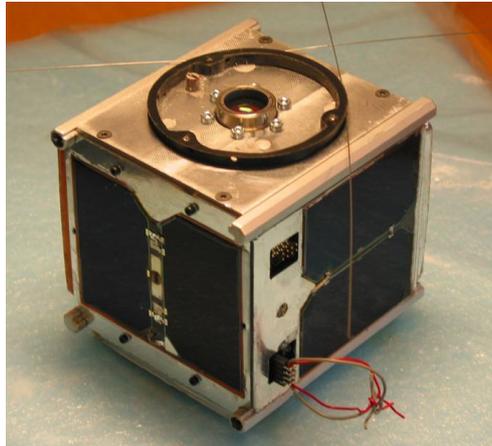
²O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais é formado pelos SCDs (Satélites de Coleta de Dados) e pelo *CBERS* (do inglês “*China-Brazil Earth Resources Satellite*”).

³O INPE está desenvolvendo o satélite *LATTES* que auxiliará pesquisas na área de Clima Espacial e Astronomia.

⁴Além do *CBERS* o INPE está desenvolvendo o *Amazônia* e o *MAPSAR* (que será equipado com radar).

A Figura 1.1 mostra o CubeSat alemão *AAU-CubeSat*, cujo projeto teve início em setembro de 2001.

Figura 1.1 - *AAU-CubeSat* - *CubeSat* alemão lançado em 2003.



Fonte: (CUBESAT, 2015).

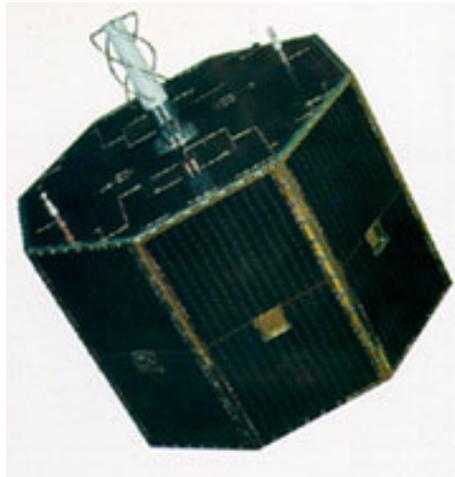
1.1.2 Os satélites brasileiros

O Satélite de Coleta de Dados (SCD-1), lançado em 1993, foi o primeiro satélite projetado e construído pelo Brasil que fez parte da Missão Coleta de Dados (ambientais) seguido pelo lançamento do SCD-2 em 1998 (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2012a). A Figura 1.2 mostra o satélite brasileiro SCD-1.

Em uma parceria entre Brasil e China com o intuito de produzir uma série de satélites de sensoriamento remoto que mapeasse os dois territórios iniciou-se a construção do *CBERS* (do inglês “*China-Brazil Earth Resources Satellite*”), Figura 1.3, (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2012b) lançado em 1999 (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2012c). Em seguida vieram o *CBERS-2*, lançado em 2003, o *CBERS-2B*, lançado em 2007 (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2012c), o *CBERS-3*, lançado em 2013, com falha do veículo lançador Longa Marcha 4B e o *CBERS-4*, lançado em 2014 (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2015).

Com a missão de fornecer dados para o monitoramento ambiental, aperfeiçoando o sistema de detecção em tempo real (DETER) do Brasil, o Amazônia-1, Figura 1.4, será o primeiro satélite a utilizar a Plataforma Multi-Missão (PMM) sendo composto

Figura 1.2 - Satélite Brasileiro SCD-1.



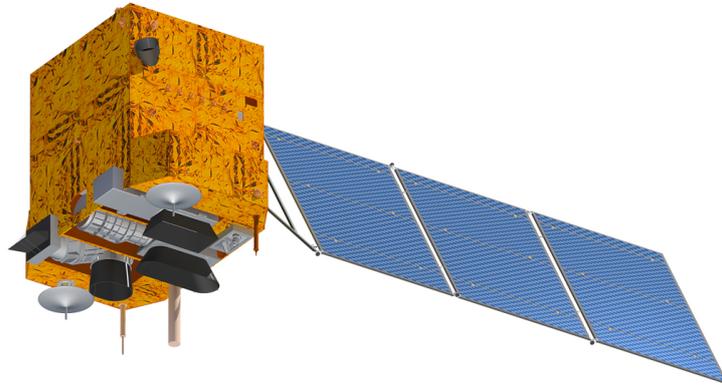
Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2003).

também por um *AWFI* (do inglês “*Advanced Wide Field Imager*”), imageador com 40 m de resolução (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2012d).

A Plataforma Multi-Missão, Figura 1.5, reúne todos os equipamentos com as funções necessárias à sobrevivência de um satélite, atendendo aos diversos tipos de missões e podendo ser adaptável a várias aplicações. Foi projetada pelo INPE e está sendo desenvolvida pela indústria nacional. A PMM dispõe de subsistemas como: Controle de Atitude e Tratamento de Dados, Controle Térmico, Estrutura Mecânica, Gestão de Bordo, Propulsão, Suprimento de Energia, Telemetria, Telecomando e Rastreamento (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2012e).

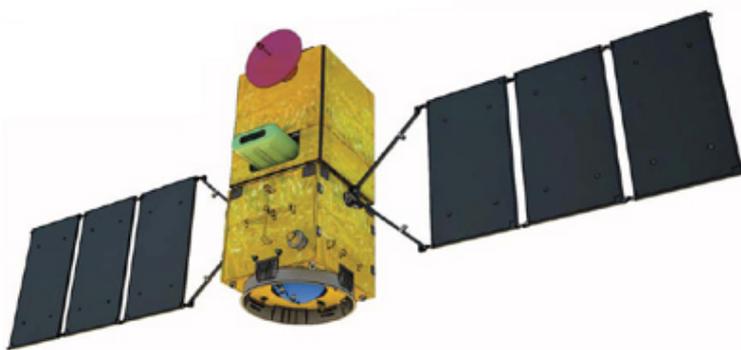
Outros satélites brasileiros estão envolvidos em diversas missões, como por exemplo o Satélite Científico *Lattes*, que possui três missões: a *Equars* (do inglês “*Equatorial Atmosphere Research Satellite*”) para estudo de fenômenos da atmosfera, a *Mirax* (Monitor e Imageador de Raios X) que deverá monitorar o núcleo da Via Láctea e uma missão de coleta de dados para o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2012f) e o Satélite *GPM-Br* (do inglês “*Global Precipitation Measurement*”) que terá a missão de fornecer informações e produtos definidos pelo Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), tais como dados sobre precipitações para diversos setores que necessitam do controle e monitoramento das chuvas (agricultura, defesa civil, energia elétrica, floresta e pesca) (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2012g).

Figura 1.3 - *CBERS-3* (“*China-Brazil Earth Resources Satellite*”).



Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2015).

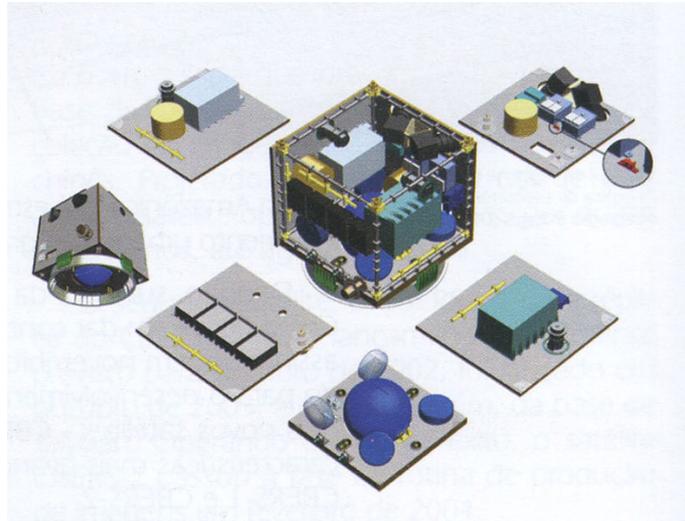
Figura 1.4 - Satélite Amazônia-1.



Fonte: (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP), 2016).

Satélites de pequeno porte também já foram e continuam sendo desenvolvidos pelo Brasil. A Figura 1.6 mostra o NanosatC-BR1, nanossatélite científico com aproximadamente 1 kg, o primeiro *Cubesat* do Brasil. Ele foi lançado em junho de 2014 pelo foguete *Dnepr* da base de *Yasny* na Rússia (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2014a) com a missão tecnológica de testar circuitos integrados nacionais resistentes à radiação e a missão científica de coletar dados do Campo Magnético Terrestre da região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul

Figura 1.5 - Plataforma Multi-Missão (PMM).



Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2011b).

(AMAS) (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2014b).

Figura 1.6 - Nanosatélite científico NanosatC-BR1.

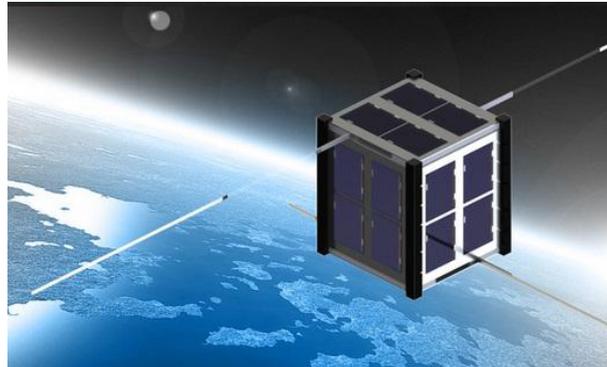


Fonte: Adaptado de (NÚCLEO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA MANTIQUEIRA (NIT), 2014).

O primeiro *Cubesat* totalmente desenvolvido no país foi o AESP-14, Figura 1.7, que teve como missão validar subsistemas elaborados por alunos de graduação e pós-graduação. Foi lançado em fevereiro de 2015 a partir da Estação Espacial Internacional (em inglês, *ISS*) através do lançador japonês *J-SSOD* (do inglês “*JEM*

Small Satellite Orbital Deployer”) (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2015a).

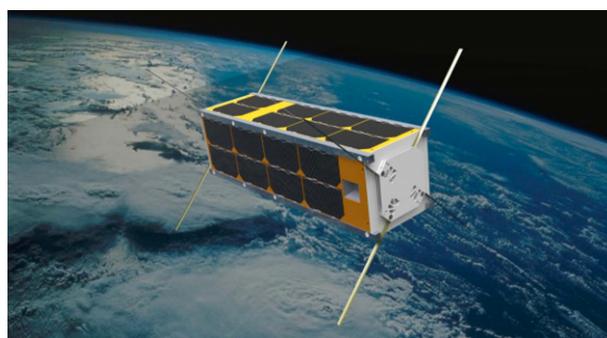
Figura 1.7 - *Cubesat* AESP-14.



Fonte: Adaptado de (QSL.NET, 2014).

Assim como o *Cubesat* AESP-14, o Serpens (Sistema Espacial para Realização de Pesquisa e Experimentos com Nanossatélites), um nanossatélite - *Cubesat* 3U, Figura 1.8, foi lançado da *ISS* e colocado em órbita utilizando o módulo *Kibo JEM* (do inglês “*Japanese Experiment Module*”) com o objetivo principal de capacitar recursos humanos e consolidar novos cursos de engenharia espacial nacionais (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB), 2015b).

Figura 1.8 - *Cubesat* SERPENS.



Fonte: (NOTÍCIAS24, 2015).

Mais satélites de pequeno porte estão em desenvolvimento como o ITASAT (nanosatélite - *Cubesat* 6U), com a função de coletar imagens e efetuar medidas de radiação, o CONASAT, constelação de seis nanosatélites para coleta de dados ambientais, (*Cubesat* 8U), entre outros (ERENO, 2014).

1.2 Propulsores de satélites

O lançamento de um satélite (transporte do satélite da superfície da Terra até uma determinada órbita) ocorre através de duas ou mais fases propulsadas. Na primeira fase o satélite é colocado numa trajetória elíptica de ascensão e depois continua (sem propulsão) em sua elipse ascendente até atingir sua órbita de altitude, onde deve permanecer. No entanto, se o satélite for deixado sem propulsão após atingir a altitude da órbita desejada irá cair na Terra voltando pela mesma elipse (que será descendente). Por esse motivo uma segunda fase propulsada se faz necessária (SILVA, 2001).

Os propulsores de satélites são mecanismos que também possibilitam aos satélites lançados ao espaço realizarem o controle de atitude, a manutenção orbital e a transferência ou correção de órbita, manobras que permitem a realização das missões e que prolongam a vida útil dos satélites artificiais (HINCKEL, 2001; KUGA, 2001; SOUZA, 2001).

O controle de atitude é necessário para que os satélites em órbita possam realizar suas missões. Dessa forma, os satélites devem ser capazes de seguir trajetórias definidas no espaço (se orientando e apontando suas câmeras, antenas e instrumentos para os pontos determinados de observação) ou enviar sinais de comunicação (HINCKEL, 2001).

A manutenção orbital é necessária devido ao arrasto, o qual ocorre pelo atrito atmosférico, que exerce uma força na direção contrária à velocidade do satélite, fazendo com que a altitude da sua órbita diminua. O arrasto é uma das perturbações ambientais que afetam a órbita dos satélites. Outras perturbações ambientais são: o geopotencial (devido à assimetria de distribuição de massa da Terra), a pressão de radiação solar direta e indireta, a atração gravitacional do Sol e da Lua, e a atração de marés terrestres (mudanças geopotenciais da Terra ocasionadas pela interação gravitacional da Terra com a Lua e o Sol) e oceânicas (KUGA, 2001).

A transferência de órbita ocorre quando o satélite precisa mudar da órbita balística para a órbita de estacionamento e da órbita de estacionamento para a órbita

final. Pode-se também classificar a transferência de órbita como um requisito de manutenção de satélites (apontamento de painéis solares para o Sol, orientação do satélite em relação ao Sol para que as condições térmicas adequadas sejam mantidas e apontamento de antenas para a Terra) (SOUZA, 2001).

As manobras orbitais e de atitude podem ser realizadas através da utilização de propulsores com diferentes potências relativas de acordo com cada finalidade, conforme apresentado na Tabela 1.3. Para cada caso a potência relativa irá variar de acordo com as dimensões e a massa do satélite (PILCHOWSKI, 2001).

Tabela 1.3 - Potência relativa dos propulsores para manobras orbitais e de atitude.

Propulsor	Manobra
Baixa potência	Atitude
Média potência	Correção de órbita
Alta potência	Transferência de órbitas

Fonte: Adaptado de (PILCHOWSKI, 2001).

1.3 Propulsores elétricos

Propulsores químicos utilizam a energia química dos propelentes para produzir empuxo transformando a energia de ligação molecular dos propelentes em energia cinética de exaustão. Já os propulsores elétricos utilizam energia de origem elétrica para acelerar o propelente e produzir empuxo (COSTA; INTINI MARQUES, 2004).

A alta eficiência de utilização de massa de propelente é a principal característica de propulsores elétricos para a propulsão de veículos espaciais. A quantidade reduzida de propelente que deverá ser embarcada no veículo espacial permite que uma maior carga útil possa ser transportada e que se alcancem missões espaciais que seriam inviáveis com foguetes químicos convencionais. Além disso, a alta velocidade de exaustão dos propulsores elétricos permite que veículos espaciais e satélites realizem missões de longo alcance como voos interplanetários, ou missões de longa duração executando manobras de manutenção orbital e de atitude (posição e orientação) por muitos anos (JAHN, 1964).

A propulsão elétrica é definida como sendo “a aceleração de gases para propulsão por aquecimento elétrico e/ou por forças de origem elétrica e magnética” e pode ser

dividida em três categorias, conforme mostra a Tabela 1.4 (JAHN, 1964).

Tabela 1.4 - Categorias da Propulsão Elétrica.

Categoria	Definição	Exemplos
Propulsão Eletrotérmica	O gás propelente é aquecido eletricamente e depois expandido em uma tubeira De Laval (convergente-divergente).	Resistojato e Arcjato.
Propulsão Eletrostática	O propelente é acelerado por aplicação direta de campos elétricos em partículas ionizadas.	Propulsor Iônico, propulsão elétrica de emissão de campo (<i>FEEP</i> , da sigla em inglês).
Propulsão Eletromagnética	O propelente é ionizado e acelerado pela força resultante da interação entre a corrente elétrica e o campo magnético auto-induzido, conhecida como força de <i>Lorentz</i> .	Propulsor de Plasma Pulsado (<i>PPT</i>), Propulsor <i>Hall</i> e Propulsor indutivo Pulsado.

Fonte: Adaptado de (JAHN, 1964; INTINI MARQUES, 2009).

A Tabela 1.5 apresenta diversos tipos de propulsores elétricos e seus típicos parâmetros de desempenho¹ (INTINI MARQUES, 2009). Esses parâmetros são: empuxo, impulso total e impulso específico.

O empuxo de um propulsor, T , é a força propulsiva obtida pela ejeção de propelente em alta velocidade e sua unidade, no SI, é o newton (N). O impulso total, I , é a integral do empuxo (T) durante o tempo em que o propulsor encontra-se em funcionamento (e.g. de t_1 a t_2), como mostra a Equação 1.1. No SI a unidade do impulso total é o N·s.

$$I = \int_{t_1}^{t_2} T dt \quad (1.1)$$

Já o impulso específico, importante parâmetro de desempenho de sistemas propul-

¹Os valores apresentados são referências apenas para comparação.

sivos, I_{sp} , é a razão entre o impulso total (I) e o peso total de propelente ejetado, similar ao conceito de quilômetros por litro de um automóvel. O impulso específico é mostrado na Equação 1.2, onde m é a massa total do propelente ejetado (kg) e g_0 é a aceleração gravitacional ao nível do mar ($g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$) (SUTTON; BIBLARZ, 2000). Sua unidade, no SI, é o segundo (s).

$$I_{sp} = \frac{I}{m \cdot g_0} \quad (1.2)$$

Tabela 1.5 - Alguns propulsores elétricos e seus típicos parâmetros de desempenho.

Tipo	Faixa de empuxo (mN)	Impulso específico (s)	Eficiência do propulsor ¹ (%)	Duração do empuxo	Propelente(s) utilizado(s)	Potência específica (W/mN)
Resistojato	200-300	200-350	65-90	Meses	NH ₃ , N ₂ H ₄ , H ₂	0,5-6
Arcojato	200-1000	400-1000	30-50	Meses	H ₂ , N ₂ , N ₂ H ₄ , NH ₃	2-3
Motor iônico	0,01-200	1500-5000	60-80	Meses	Xe, Ar, Kr	10-70
Propulsor de Plasma Pulsado Sólido (<i>PPT</i>)	0,05-10	600-2000	5-16	Anos	Teflon ^{TM3}	10-50
Arcojato <i>MPD</i>	0,001-2000	2000-5000	30-50	Semanas	Ar, Xe, H ₂ , Li	100
Propulsor <i>Hall</i>	0,01-2000	1500-2000	30-50	Semanas	Ar, Xe	100
Propulsor Monopropelente ²	30-400000	200-250	87-97	Minutos-Horas	N ₂ , H ₄	—

Fonte: Adaptado de (INTINI MARQUES, 2009).

1.3.1 Propulsores de Plasma Pulsado - *PPTs*

Os propulsores de plasma pulsado são propulsores elétricos que pertencem à categoria da propulsão eletromagnética (JAHN, 1964). Existem basicamente duas configurações principais de *PPTs*: a configuração do *PPT* retangular ou de placas paralelas e a configuração do *PPT* coaxial (BURTON et al., 2000). Em ambas as configurações

¹A eficiência foi definida como: Eficiência = $\frac{\text{potência cinética de saída do propulsor}}{\text{potência elétrica de entrada}}$

²Não é um propulsor elétrico e foi apresentado apenas para comparação.

³TeflonTM é uma marca registrada da *DuPont Company*.

do *PPT* o empuxo é obtido por forças eletromagnéticas ($\vec{j} \times \vec{B}$) e por forças eletrotérmicas (gás dinâmico). No entanto, o mecanismo eletromagnético é predominante em relação ao mecanismo eletrotérmico, o que resulta na classificação dos *PPTs* na categoria da propulsão eletromagnética (COSTA; INTINI MARQUES, 2004).

O veículo espacial *Zond 2* foi o primeiro a utilizar um *PPT* no espaço, lançado em 1964 pela extinta União Soviética. Quatro anos depois, em 1968, os Estados Unidos lançaram um sistema utilizando *PPTs* a bordo do satélite *LES-6*. Desde então outros testes envolvendo veículos espaciais e utilizando *PPTs* foram realizados, conforme descrito na Tabela 1.6 (NASA GLENN RESEARCH CENTER, 2004).

Tabela 1.6 - Testes de veículos espaciais realizados com *PPTs*.

Descrição do teste	Veículo espacial	Ano de lançamento
Manobras de correção devidas ao arrasto realizadas pelo programa americano <i>TIP</i> (<i>Transit Improvement Program</i>)	<i>TIP II</i> e <i>TIP III</i>	1975 e 1976, respectivamente
Manobras para manter o posicionamento relativo (<i>stationkeeping</i>).	Satélites <i>LES-8</i> e <i>LES-9</i>	1976
Manobras de correção devidas ao arrasto realizadas pelo primeiro sistema de navegação por satélites desenvolvido pela marinha americana (<i>Navy Navigation Satellites - NNS</i>).	Satélites <i>Nova 1</i> , <i>Nova 3</i> e <i>Nova 2</i>	1981, 1984 e 1988, respectivamente.

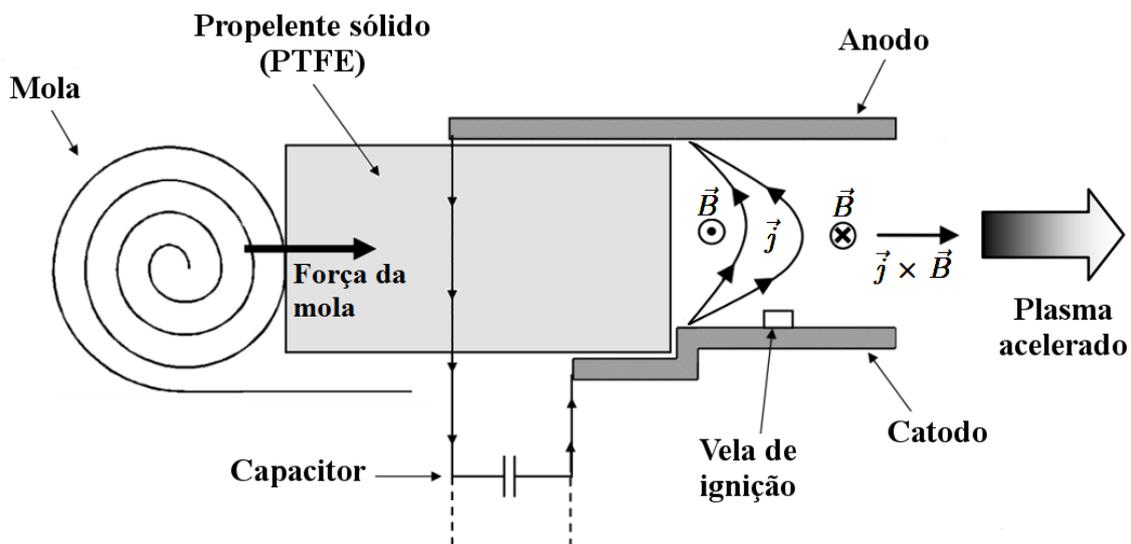
Fonte: Adaptado de (NASA GLENN RESEARCH CENTER, 2004).

Os *PPTs* possuem impulso específico (I_{sp}^1) na faixa de 600 a 2000 segundos, característica que os tornam adequados para serem utilizados em missões que exijam grandes variações na velocidade total (ΔV) do veículo espacial. Os valores de empuxo, que estão na faixa de 0,05 a 10 mN, podem ser obtidos através da variação da frequência de disparo (ou descarga) do capacitor. Já o parâmetro impulso (*impulse bit* - I_{bit}) do *PPT*, pode variar de acordo com o nível da tensão aplicada ao capacitor (variação da energia armazenada do capacitor) (SUTTON; BIBLARZ, 2000; CASSADY et al., 2000).

¹O impulso específico, pode ser relacionado com a variação total da velocidade do veículo espacial (ΔV) como sendo: $\Delta V = I_{sp} g_0 \ln(m_i/m_f)$, ou seja, mantendo-se uma razão de massas (m_i/m_f), para que se tenha uma variação de velocidade o I_{sp} deve ser aumentado; m_i e m_f são as massas inicial e final, respectivamente (SUTTON; BIBLARZ, 2000).

Em uma configuração básica, conforme mostra a Figura 1.9, o empuxo gerado pelo *PPT* é obtido por um capacitor que produz uma descarga elétrica de alta tensão sobre a superfície de um propelente sólido (geralmente o PTFE, Politetrafluoretileno - *TeflonTM*), causando a sublimação, dissociação e ionização do propelente, gerando plasma e gases não ionizados (COSTA; INTINI MARQUES, 2004). O plasma é acelerado pela força de *Lorentz* ($\vec{j} \times \vec{B}$), força eletromagnética resultante do acoplamento da densidade de corrente elétrica (\vec{j}) da descarga do capacitor e do campo magnético auto-induzido (\vec{B}) (BURTON; TURCHI, 1998) enquanto que os gases não ionizados são acelerados por expansão térmica (gás dinâmico) (VONDRA et al., 1970).

Figura 1.9 - Configuração básica de um propulsor de plasma pulsado (*PPT*), a densidade de corrente elétrica (\vec{j}), o campo magnético auto-induzido (\vec{B}) e a força de *Lorentz* ($\vec{j} \times \vec{B}$).



Fonte: Adaptado de (INTINI MARQUES, 2009).

Os *PPTs* apresentam diversas características que podem ser vistas como vantagens em relação a outros propulsores. A Tabela 1.7 apresenta algumas dessas características dos *PPTs* e suas vantagens (PALUMBO; GUMAN, 1972; COSTA; INTINI MARQUES, 2004).

Os *PPTs* são propulsores elétricos que possuem fácil construção com boa confiabilidade e grande vida útil a um custo relativamente baixo (COSTA; INTINI MARQUES,

Tabela 1.7 - Características dos *PPTs* e suas vantagens.

Característica	Vantagem
Não necessita de tempo para aquecimento.	Não consome energia em modo de espera (<i>standby</i>).
Escalável para os requisitos de desempenho	Pode ser desenvolvido atendendo à diversas missões levando-se em conta a massa da fonte de alimentação como limitação.
Pode ser utilizado em satélites com estabilização por rotação ou estabilização nos três eixos.	Seu uso não é limitado ao tipo de sistema de estabilização do satélite.
Pode utilizar o PTFE como propelente sólido.	Não utiliza tanques, linhas de alimentação, lacres, válvulas mecânicas; possui fácil cálculo de consumo de propelente; é compatível com vácuo, criogenia e gravidade zero; não é corrosivo e não é tóxico (em fase sólida) podendo ser armazenado por longo período; não é afetado por bruscas variações de temperatura nem por grandes acelerações.
Possui impulso (<i>impulse bit</i>) discreto compatível com lógica digital.	Grande repetibilidade e possibilidade de que um pulso digital <i>TTL</i> (<i>transistor-transistor logic</i>) acione o propulsor.
Permite variação da frequência e da energia da descarga do capacitor.	Possibilita nível de empuxo variável.
Desempenho compatível com os requeridos para o controle de atitude e manutenção de órbita.	Permite o aumento da vida útil de satélites.
Resistente à mudanças de temperatura.	Permite sua operação em uma larga faixa de temperaturas ambientais como as encontradas no espaço.
Possibilidade de variação do empuxo de maneira bem precisa.	Maior capacidade de controle do vetor empuxo.
Capacidade de fornecer impulsos muito pequenos ($\sim \mu\text{N}\cdot\text{s}$)	Permite um ajuste mais preciso de altitude e posicionamento de satélites.

Fonte: Adaptado de (PALUMBO; GUMAN, 1972; COSTA; INTINI MARQUES, 2004).

2004). Além disso, esses propulsores elétricos possuem aplicabilidade em satélites, sondas espaciais e outros veículos permitindo a realização de manobras de manutenção e transferência orbital (GUMAN; NATHANSON, 1970; VONDRA; THOMASSEN, 1974; VONDRA, 1976; AKIMOV et al., 1997) e também compensação de arrasto, voo em formação (EBERT et al., 1989) e controle de atitude (MECKEL et al., 1997).

A utilização de propulsores de satélites adequados permite que os satélites realizem suas missões por mais tempo, o que aumenta a vida útil desses satélites artificiais. A Tabela 1.8 mostra *Cubesats* de diversos tamanhos em diferentes órbitas e o aumento percentual da vida útil desses minissatélites artificiais que pode ser obtido com o uso do propulsor de satélite *PPTCUP* (do inglês “*Pulsed Plasma Thruster for CubeSat Propulsion*”) para a manobra de manutenção orbital de compensação de arrasto (MARS SPACE LTD, 2014).

Tabela 1.8 - *Cubesats* e o aumento percentual da sua vida útil em diferentes órbitas com o uso do propulsor de satélite *PPTCUP*.

Altitude	Tamanho do Cubesat	Vida útil natural ¹	Vida útil com o <i>PPTCUP</i>	Aumento percentual
250 km	1U	5,7 d	17 d	200 %
	2U	11 d	22 d	100 %
	3U	17 d	28 d	66 %
300 km	1U	21,6 d	58 d	170 %
	2U	1 m 13 d	2 m 19 d	85 %
	3U	2 m 4 d	3 m 11 d	56 %
350 km	1U	2 m 8 d	5 m 21 d	150 %
	2U	4 m 16 d	8 m	75 %
	3U	6 m 24 d	10 m 8 d	50 %
400 km	1U	6 m 12 d	1 a 3 m	140 %
	2U	1 a 1 m	1 a 10 m	70 %
	3U	1 a 7 m	2 a 4 m	46 %
450 km	1U	1 a 5 m	3 a 3m	133 %
	2U	2 a 10 m	4 a 8m	67 %
	3U	4 a 2 m	6 a	44 %

Fonte: Adaptado de (MARS SPACE LTD, 2014).

1.4 Motivação e objetivo do trabalho

Devido à grande aplicabilidade dos *PPTs* como sistemas propulsivos de satélites artificiais, sondas espaciais e outros veículos para a realização de diversas funções como manobras orbitais (manutenção e transferência) e manobras de controle de atitude, testes que caracterizem esses propulsores elétricos são muito importantes. Os testes de caracterização de propulsores envolvem a obtenção de alguns parâmetros (e.g., empuxo, impulso específico e eficiência), os quais servirão para avaliar o desempenho

¹Refere-se à durabilidade do satélite sem o uso de propulsores. (Na Tabela, d = dia, m = mês e a = ano).

do *PPT* em relação ao consumo de massa de propelente e a capacidade do propulsor de modificar a velocidade do veículo espacial ao qual sua força de empuxo está sendo aplicada (GOEBEL; KATZ, 2008).

A medida do impulso total, I , ou do impulso por pulso - *impulse bit*, I_{bit} , permite a obtenção do empuxo (parâmetro de desempenho, T) do propulsor e deve ser feita através de uma balança de empuxo apropriada. Essa balança de empuxo deve ser capaz de medir valores de impulso de *PPTs* com uma incerteza característica da configuração (topologia estrutural) utilizada pela balança, o que permite realizar a caracterização inequívoca desses tipos de propulsores elétricos. Para os μ *PPTs* (*PPTs* que consomem potência de até 10 W) a faixa de valores de impulso encontra-se entre 20 a 150 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ e balanças de empuxo que utilizam a configuração de pêndulo de torção medem o impulso com uma incerteza na faixa de 12 % a 15 % (CIARALLI et al., 2013).

Assim como o impulso total, os parâmetros impulso por pulso e empuxo de propulsores estão relacionados conforme descrito na Equação 1.3. Essa relação mostra que o impulso por pulso, I_{bit} , é a integral do empuxo, T , durante o período em que o propulsor encontra-se em funcionamento, ou seja, durante o tempo de atuação da força de empuxo (t_{on} a t_{off}). Para o *PPT* esse período de funcionamento corresponde ao ciclo de descarga do capacitor sobre o propelente (INTINI MARQUES, 2009).

$$I_{bit} = \int_{t_{on}}^{t_{off}} |T| dt \quad (1.3)$$

onde:

I_{bit} é o impulso por pulso (impulso elementar) do propulsor (*impulse bit*);

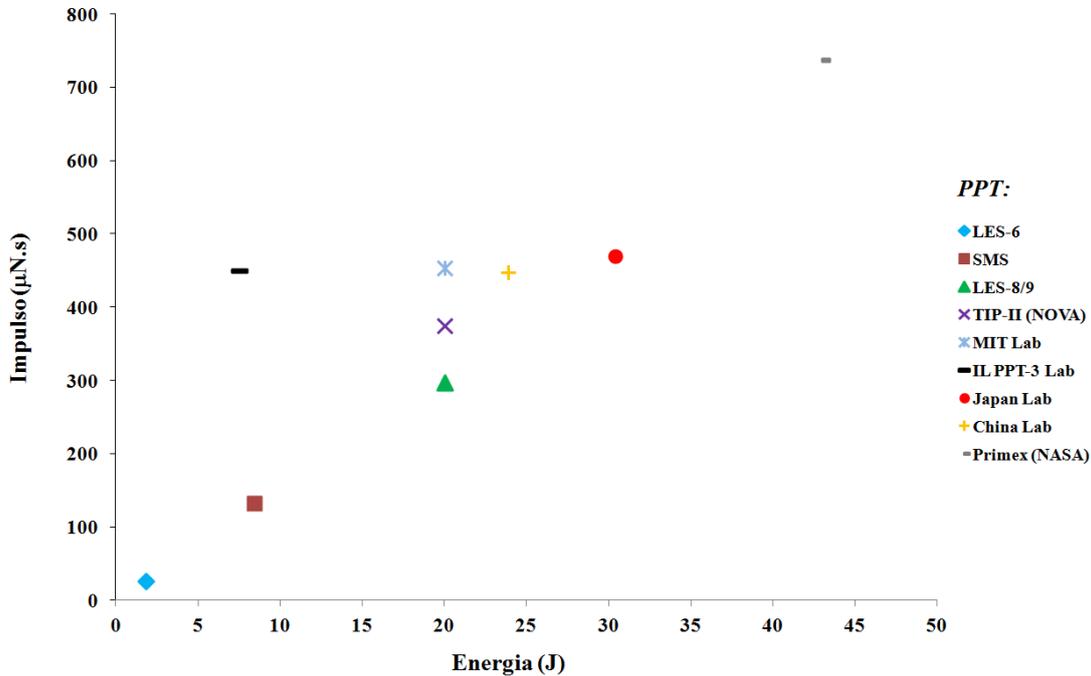
$|T|$ é o módulo da força de empuxo;

t_{on} é o início da descarga do capacitor (início da atuação da força) ;

t_{off} é o instante de tempo em que a força deixa de agir;

Diversos *PPTs* foram desenvolvidos com valores de impulso por pulso (*impulse bit*) que variam conforme a geometria dos eletrodos utilizados no *PPT* (geometria de construção) e também conforme a quantidade de energia consumida pelo *PPT*. O gráfico da Figura 1.10 mostra alguns tipos de *PPTs* de diferentes laboratórios e os

Figura 1.10 - Impulso por pulso de diferentes *PPTs* de acordo com a energia utilizada pelo propulsor.



Os valores de impulso ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$), apresentados no gráfico correspondem ao impulso de um pulso e os valores de energia (J) à energia do pulso.

Fonte: Adaptado de (COSTA; INTINI MARQUES, 2004).

valores do impulso por pulso obtidos por cada um deles, de acordo com a quantidade de energia utilizada pelo propulsor (COSTA; INTINI MARQUES, 2004).

Neste trabalho será utilizado apenas o termo impulso para se referir ao impulso por pulso (I_{bit}) de um *PPT*.

O Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais possui dois propulsores de plasma pulsado de dupla descarga, o *DD-PPT X1* e o *DD-PPT X2*, os quais tiveram seus impulsos eletromagnéticos (*electromagnetic impulse bit*) estimados com base na integral do quadrado da corrente de descarga dos capacitores (dois capacitores, um por estágio) e nos gradientes de indutância, utilizando bobinas *Rogowski* (dois sensores de corrente, marca *PEM CWT Rogowski*, com bobinas e integrador) para a medição da corrente de descarga do capacitor em cada estágio do *PPT* (FIN, 2014; MARIN, 2014). Além do empuxo eletromagnético do *PPT*, proveniente da força de Lorentz ($\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$) (BURTON;

TURCHI, 1998), existe também uma parcela do empuxo devida às forças eletrotérmicas (gás dinâmico) (VONDRA et al., 1970) que não pode ser medida sem uma balança de empuxo adequada. Portanto, o uso de uma balança de empuxo permitirá a medição direta do impulso total (eletromagnético e gás dinâmico) dos propulsores.

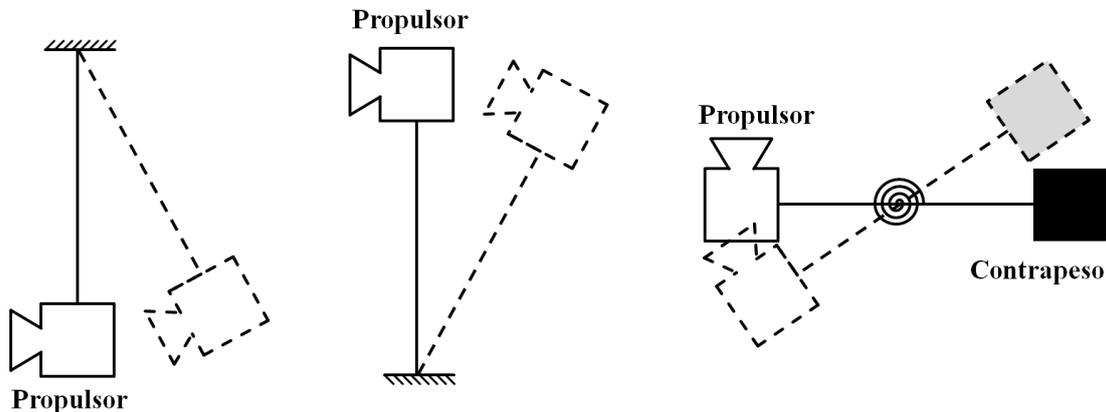
O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver, testar e caracterizar uma balança de empuxo para propulsores de plasma pulsado (*PPTs*). Dentre as diversas configurações de balança de empuxo já desenvolvidas, utilizar-se-á a configuração de um pêndulo de torção devido à sua simplicidade de construção e ao seu baixo custo. Um dispositivo de calibração eletrostática (DCE) permitirá calibrar e comparar o valor do empuxo aplicado pelo DCE com o medido pela balança. O DCE e o propulsor elétrico deverão ser montados sobre a balança caracterizando uma medição direta do empuxo. Os testes e as medições deverão utilizar métodos convenientes para que o erro da medida do empuxo esteja dentro da faixa de valores típicos para este tipo de balança.

1.5 A medição de empuxo

A primeira balança de empuxo para medir forças de poucos μN surgiu no trabalho intitulado “*Design and Development of a Micropound Extended Range Thrust Stand (MERTS)*” (STARK et al., 1971), a qual utilizou pivôs de flexão e forças eletromagnéticas para calibração e amortecimento, realizando a medição de empuxo contínuo e pulsado. O peso do propulsor e a resistência estrutural da balança combinada com a sensibilidade de medição são obstáculos técnicos que dificultam o projeto e a operação de balanças para a medição de empuxos de μN . Outro problema são os ruídos ambientais próximos da balança de empuxo que podem sobrecarregar seu movimento causando erros de medição e impedindo que se faça uma calibração com boa precisão devido ao baixo nível de empuxo (GAMERO-CASTAÑO, 2003).

As técnicas de medição de empuxo para sistemas de micropropulsão podem ser classificadas de acordo com a posição do propulsor em relação à balança de empuxo. Dessa forma, quando o propelente ejetado do propulsor (pluma) atinge a balança de empuxo a medição do empuxo é indireta. Mas quando o propulsor é montado sobre a própria balança de empuxo a medição do empuxo é direta. Outra classificação que pode ser feita é com base na topologia estrutural do sistema de medição. Nessa classificação as balanças de empuxo podem ser configuradas como pêndulo de suspensão (pêndulo simples), pêndulo invertido e pêndulo de torção, que são as configurações mais comuns para esse tipo de balança (BIJSTER, 2014). A Figura 1.11 mostra as três configurações mais comuns de pêndulos para as balanças de empuxo.

Figura 1.11 - Configurações mais comuns de pêndulos para balanças de empuxo.



Pêndulo simples (esquerda), pêndulo invertido (meio), pêndulo de torção (direita).

Fonte: Adaptado de (BIJSTER, 2014).

A medição do empuxo de propulsores químicos pode ser feita através do uso de células de carga, no entanto a medição do empuxo de propulsores elétricos não permite a utilização desses dispositivos (células de carga) devido ao baixo valor da relação empuxo/peso do propulsor. Assim, a medição do empuxo do *PPT* deve ser feita através do uso de dispositivos em que o deslocamento físico de um dos componentes mecânicos do sistema da balança seja utilizado para inferir a força aplicada. Balanças de empuxo com calibração por deslocamento estão sendo amplamente desenvolvidas para a avaliação do desempenho de propulsores elétricos. Essas balanças fazem uso das três configurações mais comuns: pêndulo de suspensão (pêndulo simples), pêndulo invertido e pêndulo de torção (MARKUSIC et al., 2004). A Tabela 1.9 mostra as vantagens e desvantagens das três configurações mais comuns de balanças de empuxo para propulsores elétricos.

Devido às vantagens da configuração de pêndulo de torção apresentadas na Tabela 1.9, o desenvolvimento da balança de empuxo, objetivo desse trabalho, utilizou essa mesma topologia de construção. Portanto, a dinâmica da balança de empuxo será a mesma do pêndulo de torção, que é determinada pela equação do oscilador harmônico que será apresentada na seção 1.6.1.

1.6 O pêndulo de torção

A Figura 1.12 mostra um exemplo de um pêndulo de torção no qual uma barra retangular é suspensa por um fio de torção e equilibra dois blocos (A e B) com as

Tabela 1.9 - Vantagens e desvantagens das configurações mais comuns de balanças de empuxo para propulsores elétricos.

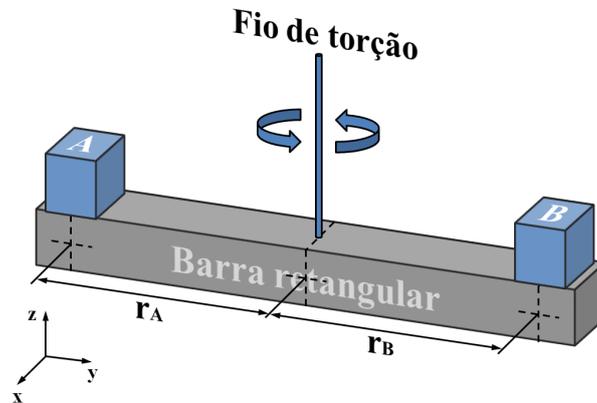
Configuração	Vantagens	Desvantagens
Pêndulo de suspensão (pêndulo simples)	Simplicidade de construção, baixo custo e alta estabilidade.	Força de restauração dependente da massa do propulsor e sensibilidade dependente do comprimento do pêndulo, o que exigiria instalações de testes (câmaras de vácuo) de grandes dimensões para uma boa sensibilidade.
Pêndulo invertido	Maior sensibilidade do que a configuração de pêndulo simples.	Baixa estabilidade com forte dependência da rigidez dos flexores que pode variar ao longo dos testes devido ao aquecimento.
Pêndulo de torção	Simplicidade de construção, baixo custo, alta estabilidade e força de restauração independente da massa do propulsor.	Sensibilidade dependente do comprimento do braço (no entanto, o uso de suportes especiais de flexão com baixa histerese e baixo coeficiente de atrito minimiza este problema, permitindo que a balança seja mais compacta).

Fonte: Adaptado de (MARKUSIC et al., 2004).

mesmas dimensões, massas iguais ($m_A = m_B$) e equidistantes ($r_A = r_B$) em relação ao centro, onde o fio prende a barra. Os blocos de mesma massa e equidistantes em relação ao centro da barra permitem o equilíbrio do pêndulo (eixo x) e que sua oscilação ocorra apenas em um sentido (eixo z).

O pêndulo de torção é um sistema físico que oscila harmonicamente quando sofre um pequeno deslocamento em relação a sua posição de equilíbrio. Possui elementos que são semelhantes aos do pêndulo simples: um corpo suspenso por um fio; mas com algumas diferenças: o fio do pêndulo de torção pode ter uma densidade linear maior do que o do pêndulo simples e o corpo que fica suspenso pelo fio pode ter uma distribuição de massa não puntiforme. A forma como o pêndulo de torção oscila também é diferente da do pêndulo simples: em vez do corpo ser deslocado da sua posição de equilíbrio (pêndulo simples) ele é girado em torno de seu eixo vertical (pêndulo de torção). Esse movimento deforma o fio que sustenta o corpo causando um torque restaurador que faz com que o corpo oscile em torno da sua posição de equilíbrio. Essa oscilação irá se dissipar ao longo do tempo devido ao amortecimento do sistema (causado pelo atrito interno do fio e pelo atrito viscoso do meio - ar, água, óleo, etc.). Se a torção for pequena (deslocamento angular pequeno) esse

Figura 1.12 - Exemplo de um pêndulo de torção com barra.



Fonte: Produção do autor.

sistema se torna mais parecido com o sistema massa-mola e o torque restaurador fica proporcional à torção ou ao deslocamento angular. A frequência de oscilação de um pêndulo de torção depende da geometria do fio utilizado (diâmetro e comprimento), do material de que ele é feito e do momento de inércia do corpo suspenso em torno de um eixo (local de fixação do corpo ao fio) (RESNICK; HALLIDAY, 1984).

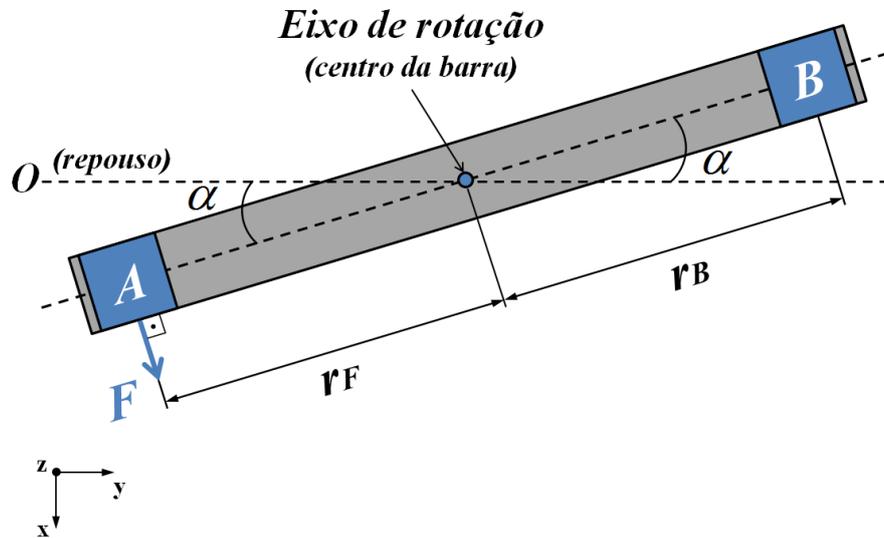
1.6.1 Dinâmica do pêndulo de torção

A dinâmica de um pêndulo de torção é determinada pela equação do oscilador harmônico e será descrita a seguir. A Figura 1.13 mostra a vista superior do pêndulo de torção com barra onde uma força de intensidade $F(t)$ (e.g. força de empuxo) é aplicada à uma distância r_F em relação ao eixo de rotação e perpendicular à barra.

Sobre a barra existem dois blocos, A e B, equidistantes em relação ao eixo de rotação ($r_A = r_F = r_B$) e de mesma massa ($m_A = m_B$) para que não haja desequilíbrio (o que causaria uma rotação no eixo x) e, quando a força for aplicada, o movimento do conjunto (barra e blocos A e B) seja apenas uma rotação no eixo z. O torque devido à intensidade da força $F(t)$, dado em N·m (no Sistema Internacional de Unidades - SI) (RESNICK; HALLIDAY, 1984), será:

$$\tau_F = F(t)r_F \quad (1.4)$$

Figura 1.13 - Vista superior do pêndulo de torção com barra.



Fonte: Produção do autor.

O fio que sustenta a barra (eixo de rotação) sofrerá uma torção elástica causada pelo movimento de deslocamento da barra (ângulo de deslocamento α) devido à ação da força aplicada e tenderá a reagir contra esse movimento (por isso terá um sinal negativo) retornando ao seu estado inicial (repouso) através de um “torque restaurador” (RESNICK; HALLIDAY, 1984) dado por:

$$\tau_r = -\kappa\alpha \quad (1.5)$$

onde:

τ_r é o “torque restaurador” do fio;

κ é a constante elástica de torção do fio (semelhante à constante elástica de uma mola), dada em N·m/rad no SI. Depende do material, da seção transversal e do comprimento do fio;

α é o deslocamento angular sofrido pela barra em radianos (rad).

A barra irá oscilar em torno da sua posição de repouso (ponto O) e essa oscilação irá se dissipar ao longo do tempo devido a um “torque de amortecimento” (causado pelo

atrito interno do fio e pelo atrito viscoso do meio) que será contrário à intensidade da velocidade angular do movimento (RESNICK; HALLIDAY, 1984) e dado por:

$$\tau_A = -\lambda\omega = -\lambda\dot{\alpha} \quad (1.6)$$

onde:

τ_A é o “torque de amortecimento”;

λ é o coeficiente de amortecimento, com unidade em N·m·s/rad no SI;

ω é o módulo da velocidade angular do pêndulo ($\frac{d\alpha}{dt}$), em rad/s no SI.

A massa total do conjunto formado pela barra com os dois blocos (A e B de mesma massa), suspenso pelo fio, irá girar variando seu momento angular com o tempo, dando origem ao torque resultante (RESNICK; HALLIDAY, 1984), dado pela equação a seguir:

$$\tau_R = \frac{d|\vec{L}|}{dt} = \frac{dL}{dt} = \frac{d(J\omega)}{dt} = J\ddot{\alpha} \quad (1.7)$$

onde:

τ_R é o “torque resultante” (barra e blocos A e B);

L é o módulo do momento angular do conjunto em kg·m²·rad/s (no SI). É dado pelo produto vetorial entre o vetor posição (\vec{r}) e o vetor do momento linear (\vec{p}): $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$. O momento linear é o produto da massa (m) pela velocidade linear (\vec{v}): $\vec{p} = m\vec{v}$. A velocidade linear é o produto de velocidade angular pelo raio do movimento circular (R): $\vec{v} = \vec{\omega}R$;

J é o momento de inércia do conjunto em kg·m² (SI). Para uma partícula de massa m à uma distância r em relação ao ponto de rotação: $J = mr^2$.

$\ddot{\alpha}$ é a derivada de segunda ordem em relação ao tempo do deslocamento angular (cada ponto representa uma derivada).

Para pequenos ângulos de deslocamento (α), considerando o movimento forçado (τ_F) e dissipativo (λ), ao se aplicar a segunda Lei de Newton para rotações ($J\ddot{\alpha} = \sum \tau$)

a dinâmica de um pêndulo de torção se torna semelhante à equação do oscilador harmônico forçado (RESNICK; HALLIDAY, 1984), obtida a partir da combinação das equações 1.4, 1.5, 1.6 e 1.7:

$$J\ddot{\alpha}(t) + \lambda\dot{\alpha}(t) + \kappa\alpha(t) = F(t)r_F \quad (1.8)$$

A Equação 1.8 é uma equação diferencial de segunda ordem e sua análise e solução serão realizadas baseadas na resolução da equação do oscilador harmônico forçado linear apresentada nos seguintes livros: “*Mechanics*” (SYMON, 1960) e “Física” (RESNICK; HALLIDAY, 1984).

O oscilador harmônico forçado linear (um sistema massa-mola no qual uma partícula com massa m , oscilando em torno de um referencial x , através de uma mola de constante elástica k , em um meio com coeficiente de atrito c e sujeita à uma força $F(t)$) possui a seguinte equação:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1.9)$$

A Equação 1.8 do pêndulo de torção (oscilador harmônico forçado angular) é semelhante à Equação 1.9 (oscilador harmônico forçado linear) sendo matematicamente idênticas (RESNICK; HALLIDAY, 1984), pois seus termos possuem a seguinte correspondência: o deslocamento angular α do pêndulo de torção corresponde ao deslocamento linear x ; o termo que aparece como sendo o momento de inércia J do pêndulo de torção corresponde à massa m da partícula; o coeficiente de amortecimento λ do pêndulo de torção equivale ao termo c do sistema massa-mola; a constante elástica de torção κ do pêndulo equivale à constante elástica k da mola e o torque τ_F ($F(t)r_F$) corresponde à força $F(t)$ (termo forçante).

Considerando-se um sistema massa-mola amortecido no qual uma força $F(t)$ é aplicada durante um intervalo de tempo (δt) muito pequeno, que possua em δt um valor grande e seja nula fora desse intervalo (e.g. um impulso), supondo-se que o oscilador esteja em repouso no início ($x = 0$) e que o deslocamento em x seja desprezível devido ao pequeno valor de δt , o momento linear imediatamente após a aplicação da força (SYMON, 1960) será:

$$mv_i = \int F dt = I_i \quad (1.10)$$

onde:

v_i é a velocidade imediatamente após o impulso;

I_i é o impulso aplicado no instante t_i .

Após o impulso aplicado, o termo forçante da Equação 1.9 passa a ser nulo e ela se torna uma equação diferencial de segunda ordem homogênea cuja solução, para o caso onde $(c/2m)^2 < (k/m)$ (o amortecimento é menor do que o amortecimento crítico) (SYMON, 1960), será:

$$x(t) = Ae^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} \cos \left[\left(\sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \right) t + \varphi \right] \quad (1.11)$$

onde:

A e φ são constantes que dependem das condições iniciais, conforme se mostrará a seguir.

O termo $\left(\sqrt{k/m}\right)$ pode ser definido como sendo ω_n e portanto, a frequência natural (f_n) do oscilador sem amortecimento, em Hz, será:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{\sqrt{k/m}}{2\pi} \quad (1.12)$$

Considerando-se o termo $\left(\sqrt{(k/m) - (c/2m)^2}\right)$, definido como ω_1 , a frequência de oscilação do sistema com amortecimento, em Hz, passa a ser:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{\sqrt{(k/m) - (c/2m)^2}}{2\pi} \quad (1.13)$$

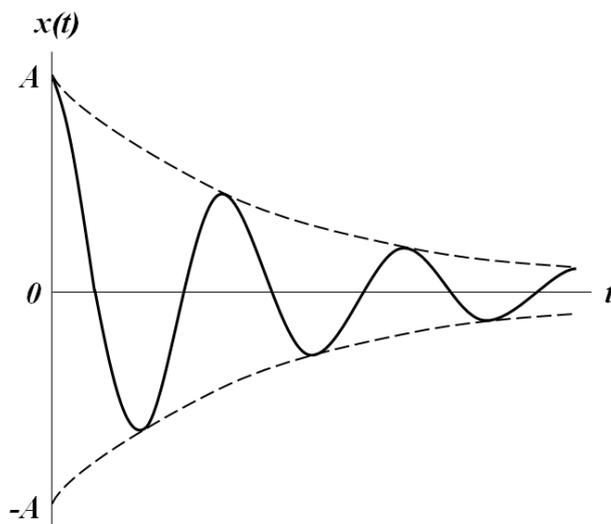
Comparando-se as Equações 1.12 e 1.13 verifica-se que a frequência de oscilação do sistema amortecido é menor do que a do sistema sem amortecimento, ou seja, $f_1 < f_n$. Caso não houvesse atrito, c seria nulo e as frequências seriam iguais, $f_1 = f_n$.

Com a definição de ω_1 a Equação 1.11 pode ser reescrita de forma simplificada como sendo:

$$x(t) = Ae^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (1.14)$$

A Figura 1.14 ilustra o deslocamento $x(t)$ em função do tempo para um sistema massa-mola submetido à um impulso para o caso onde $(c/2m)^2 < (k/m)$ (amortecimento sub-crítico) com um período igual a $2\pi/\omega_1$ (o período é o intervalo de tempo medido entre dois valores máximos positivos subsequentes). Esse deslocamento representa o movimento do oscilador harmônico amortecido. Inicialmente (em $t = 0$) o deslocamento tem seu valor máximo, $x = A$ (máxima amplitude), que vai diminuindo exponencialmente quando $t \rightarrow \infty$ devido à dissipação da energia cinética por causa do atrito (SYMON, 1960).

Figura 1.14 - Deslocamento $x(t)$ em função do tempo de um oscilador harmônico amortecido para o caso onde $(c/2m)^2 < (k/m)$ (amortecimento sub-crítico).



A curva contínua (—) representa: $x(t) = Ae^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} \cos(\omega_1 t)$ e a curva tracejada (- - -) representa o decaimento exponencial: $x(t) = \pm Ae^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t}$, que ocorre devido ao atrito.

Fonte: Adaptado de (SYMON, 1960).

Escolhendo-se como condição inicial o valor de $\varphi = -\omega_1 t_i - \pi/2$, de forma que se tenha $x = 0$ em $t = t_i$, (sendo t_i o instante de tempo onde ocorre a força do impulso) e substituindo-se a condição inicial de φ na Equação 1.14 tem-se:

$$x(t) = Ae^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} \cos[\omega_1 t + (-\omega_1 t_i - \pi/2)] = Ae^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} \cos[\omega_1(t - t_i) - \pi/2] \quad (1.15)$$

Que é equivalente a:

$$x(t) = Ae^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} \text{sen}[\omega_1(t - t_i)] \quad (1.16)$$

Derivando-se a Equação 1.16 no domínio do tempo (t) obtém-se a equação da velocidade, que no instante $t = t_i$ será:

$$v_i = Ae^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t_i} \omega_1 \quad (1.17)$$

Isolando-se a constante A na Equação 1.17 e substituindo o valor de v_i da Equação 1.10 tem-se:

$$A = \frac{I_i}{m\omega_1} e^{\left(\frac{c}{2m}\right)t_i} \quad (1.18)$$

Substituindo-se o valor da constante A da Equação 1.18 na Equação 1.16, para $t > t_i$ a solução final se torna:

$$x(t) = \frac{I_i}{m\omega_1} e^{-\left(\frac{c}{2m}\right)(t-t_i)} \text{sen}[\omega_1(t - t_i)] \quad (1.19)$$

Portanto, ao se aplicar um impulso (I_i) no instante $t = t_i$ em um sistema massa-mola amortecido inicialmente em repouso, tem-se a seguinte solução:

$$x(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } t \leq t_i, \\ \frac{I_i}{m\omega_1} e^{-\left(\frac{c}{2m}\right)(t-t_i)} \text{sen}[\omega_1(t - t_i)], & \text{se } t > t_i. \end{cases} \quad (1.20)$$

Devido à semelhança entre a Equação 1.8 do pêndulo de torção (oscilador harmônico forçado angular) com a Equação 1.9 (oscilador harmônico forçado linear), as quais são matematicamente idênticas (RESNICK; HALLIDAY, 1984), fazendo-se as mesmas considerações do oscilador harmônico linear mas agora para o angular com uma

força $F(t)$ aplicada à uma distância r_F em relação ao eixo de rotação do pêndulo de torção (torque $\tau_F = F(t)r_F$) e fazendo-se as mudanças das variáveis correspondentes, a dinâmica do pêndulo de torção será dada por:

$$\alpha(t) = A'e^{-\left(\frac{\lambda}{2J}\right)t}\cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1.21)$$

Que é equivalente a:

$$\alpha(t) = A'e^{-\left(\frac{\lambda}{2J}\right)t}\text{sen}[\omega_0(t - t_i)] \quad (1.22)$$

O momento angular imediatamente após a aplicação do torque $\tau_F = F(t)r_F$ será:

$$J\omega_i = \int \tau_F dt = r_F \int F dt = r_F I_i \quad (1.23)$$

onde:

ω_i é a velocidade angular imediatamente após o impulso.

A constante A' , analogamente à constante A será:

$$A' = \frac{r_F I_i}{J\omega_0} e^{\left(\frac{\lambda}{2J}\right)t_i} \quad (1.24)$$

Substituindo-se o valor da constante A' da Equação 1.24 na Equação 1.22, para $t > t_i$ a solução final para o pêndulo de torção se torna:

$$\alpha(t) = \frac{r_F I_i}{J\omega_0} e^{-\left(\frac{\lambda}{2J}\right)(t-t_i)} \text{sen}[\omega_0(t - t_i)] \quad (1.25)$$

Portanto, ao se aplicar um impulso (I_i) no instante $t = t_i$, à uma distância r_F do eixo de rotação de um pêndulo de torção inicialmente em repouso ($\alpha = 0$), tem-se a seguinte solução:

$$\alpha(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } t \leq t_i, \\ \frac{r_F I_i}{J\omega_0} e^{-\left(\frac{\lambda}{2J}\right)(t-t_i)} \text{sen}[\omega_0(t - t_i)], & \text{se } t > t_i. \end{cases} \quad (1.26)$$

Sendo a frequência natural (f_{nt}) do pêndulo de torção sem amortecimento, em Hz, dada por:

$$f_{nt} = \frac{\omega_{nt}}{2\pi} = \frac{\sqrt{\kappa/J}}{2\pi} \quad (1.27)$$

E a frequência natural (f_0) do pêndulo de torção com amortecimento, em Hz, dada por:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{\sqrt{(\kappa/J) - (\lambda/2J)^2}}{2\pi} \quad (1.28)$$

1.7 Força eletrostática para um capacitor de placas paralelas

Para se aplicar um impulso à balança, sem a utilização de um *PPT*, fez-se uso de um dispositivo de calibração eletrostática, o qual é formado por dois discos de alumínio configurados como um capacitor de placas paralelas e possui uma força eletrostática que é exercida nos discos quando se aplica uma diferença de potencial (d.d.p.) entre eles. As equações que definem essa força eletrostática serão definidas a seguir.

Um objeto com carga elétrica q (cuja unidade, no SI, é o C - *Coulomb*), em um campo elétrico \vec{E} (dado em N/C), está sujeito a uma força elétrica constante \vec{F}_e (em N) (HALLIDAY et al., 1993) de forma que:

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad (1.29)$$

A lei de Gauss, que relaciona o fluxo de campo elétrico Φ (unidade em N·m²/C no SI) que passa através de uma superfície gaussiana fechada ¹ e a carga elétrica q que existe dentro do volume dessa superfície (em m² no SI) (HALLIDAY et al., 1993), determina que o campo elétrico \vec{E} seja dado por:

$$\epsilon_0\Phi = q = \epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (1.30)$$

¹Superfície tridimensional imaginária que encerra uma certa quantidade de carga elétrica (q) dentro do seu volume para que, através da lei de Gauss, se possa relacionar o fluxo de campo elétrico (Φ) que atravessa essa superfície com a quantidade de carga q em seu interior (HALLIDAY et al., 1993).

onde:

ϵ_0 é a constante de permissividade do vácuo ($\epsilon_0 \approx 8,8541878176... \times 10^{-12}$ F/m);

$d\vec{A}$ é o vetor elemento de área perpendicular ao plano da superfície gaussiana.

Para uma placa plana “infinita”¹ e condutora com área A_0 e carga q a lei de Gauss fornece:

$$E = \frac{q}{A_0\epsilon_0} \quad (1.31)$$

O capacitor (componente que armazena cargas elétricas em um campo elétrico) de placas planas paralelas possui um campo elétrico que pode ser considerado uniforme (suas linhas de força são paralelas e igualmente espaçadas entre si), conforme ilustra a Figura 1.15. Esse campo elétrico pode ser considerado constante e os efeitos de borda (*fringing effects*) poderão ser desprezados quando a distância entre as placas for muito menor do que as dimensões da mesma (HALLIDAY et al., 1993).

Para o capacitor de placas paralelas como o da Figura 1.15, aplicando-se a lei de Gauss para as duas placas o campo elétrico do capacitor (E_c) será:

$$E_c = 2 \left(\frac{q}{A_0\epsilon_0} \right) \quad (1.32)$$

A diferença de potencial (d.d.p.) U (de unidade V - volts no SI) entre as placas planas e paralelas de um capacitor que possua uma distância d entre suas placas, é dada pelo produto do campo elétrico do capacitor E_c pela distância entre as placas, conforme mostra a seguinte equação:

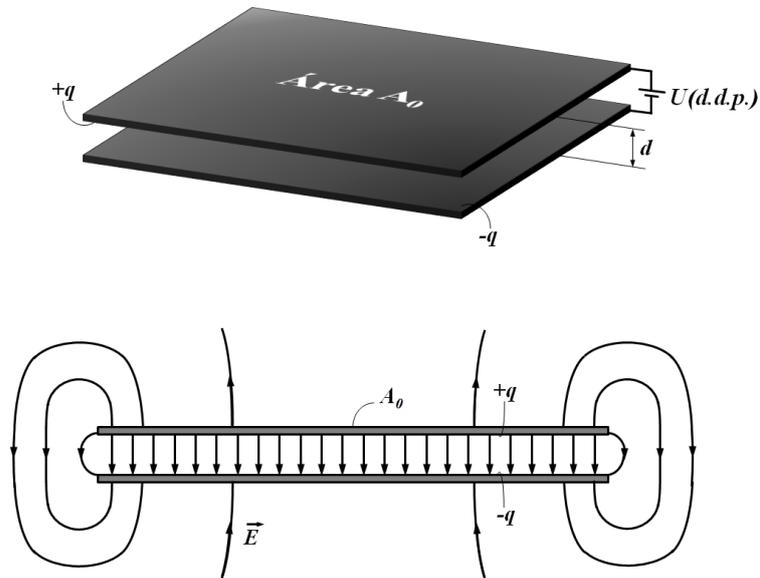
$$U = E_c d \quad (1.33)$$

A força eletrostática \vec{F}_c que uma placa do capacitor da Figura 1.15 exercerá sobre a outra será:

$$\vec{F}_c = q\vec{E}_c \quad (1.34)$$

¹O termo “infinita” significa que a distância entre a placa e o ponto onde o campo elétrico está sendo calculado é muito menor do que a área da placa (HALLIDAY et al., 1993).

Figura 1.15 - Campo elétrico de um capacitor de placas planas e paralelas.



Capacitor de placas paralelas com U (d.d.p.) aplicado entre as duas placas de área A separadas por uma distância d (superior), linhas de campo elétrico \vec{E} e efeitos de borda (inferior).

Fonte: Adaptado de (HALLIDAY et al., 1993).

Isolando-se q na Equação 1.32, E_c na Equação 1.33, os substituindo em 1.34 e rearranjando-se os termos obtém-se a intensidade da força eletrostática exercida nas placas do capacitor:

$$F_c = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{U}{d} \right)^2 A_0 \quad (1.35)$$

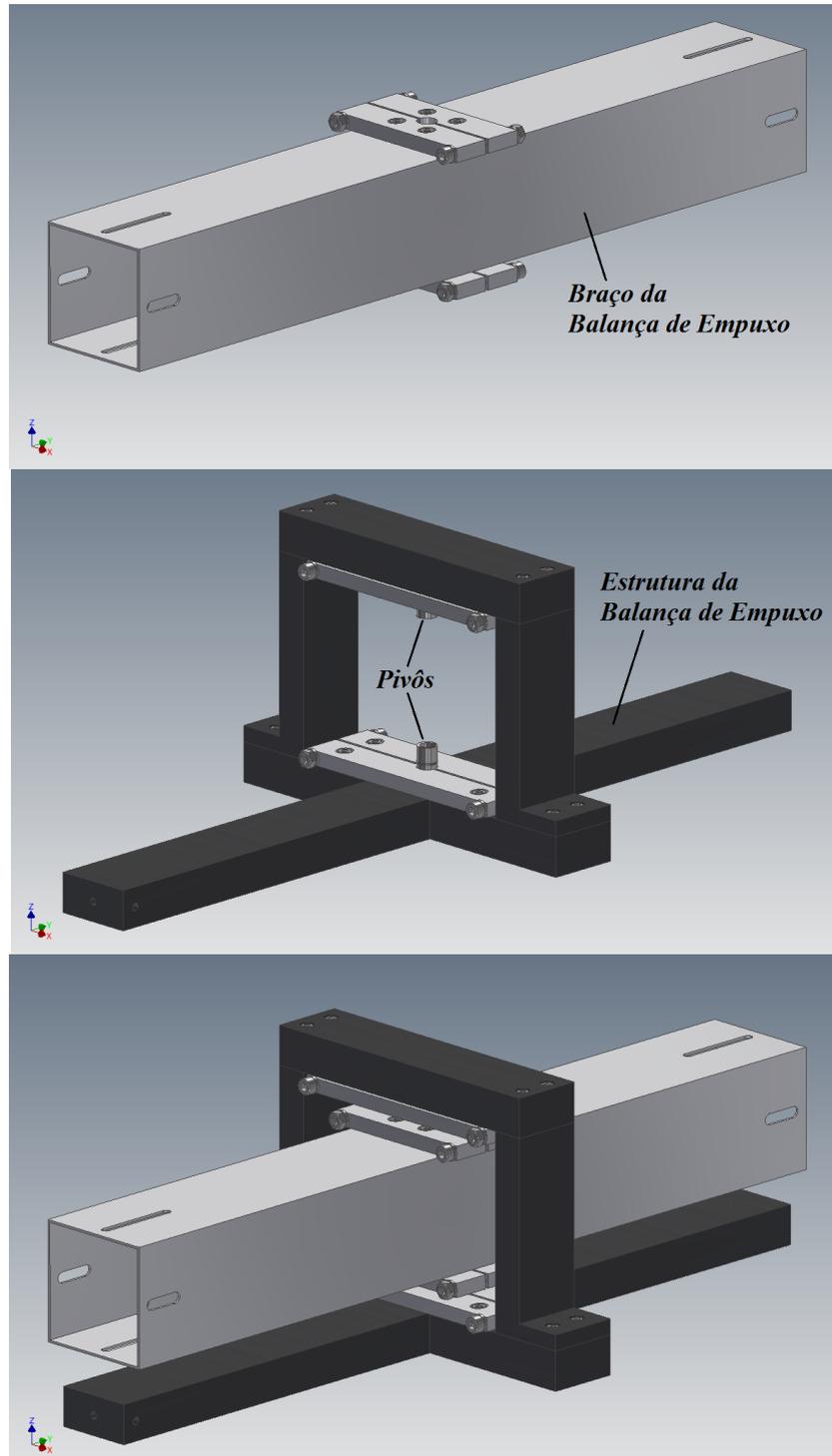
2 A BALANÇA DE EMPUXO

2.1 Descrição

A balança de empuxo é constituída de um tubo de alumínio de perfil quadrado (com 76 mm de lado e 550 mm de comprimento), o qual é fixado em uma estrutura (base de apoio) de aço inox não magnético (o que reduz possíveis induções de corrente na estrutura da balança as quais poderiam produzir perturbações magnéticas) através de dois pivôs de torção (elemento restaurador). As dimensões da balança de empuxo foram determinadas para que a balança pudesse ser utilizada no interior de uma câmara de vácuo com ≈ 1 m de diâmetro e 2 m de comprimento. O braço da balança foi disposto com sua maior dimensão (comprimento) perpendicular ao eixo axial da câmara de vácuo de forma que o propelente seja ejetado ao longo deste eixo.

A Figura 2.1 mostra a balança de empuxo configurada como um pêndulo de torção e foi desenvolvida com o auxílio do *software AutoDesk Inventor[®] Professional 2016* versão educacional. Nela observa-se o braço da balança (tubo de alumínio de perfil quadrado), a estrutura em aço inox com os pivôs de torção e o braço da balança fixado na estrutura através dos pivôs, configuração correspondente à de um pêndulo de torção. O tubo de alumínio (braço da balança) irá se deslocar horizontalmente sob a ação de uma força externa (e.g. empuxo) que deverá ser aplicada perpendicularmente ao braço da balança. Essa topologia de construção foi escolhida devido às vantagens da configuração de pêndulo de torção apresentadas na Tabela 1.9. Nessa configuração, o aumento da sensibilidade da balança de empuxo é diretamente proporcional ao comprimento do seu braço, que fica limitado às dimensões da câmara de vácuo utilizada para os testes com o *PPT* e ao posicionamento do propulsor dentro da câmara. O uso dos pivôs de torção (dispositivos que possuem baixa histerese e baixo coeficiente de atrito) permite que a balança de empuxo seja mais compacta mantendo-se uma boa sensibilidade e restringe os movimentos da balança à apenas um grau de liberdade.

Figura 2.1 - Balança de empuxo configurada como um pêndulo de torção.

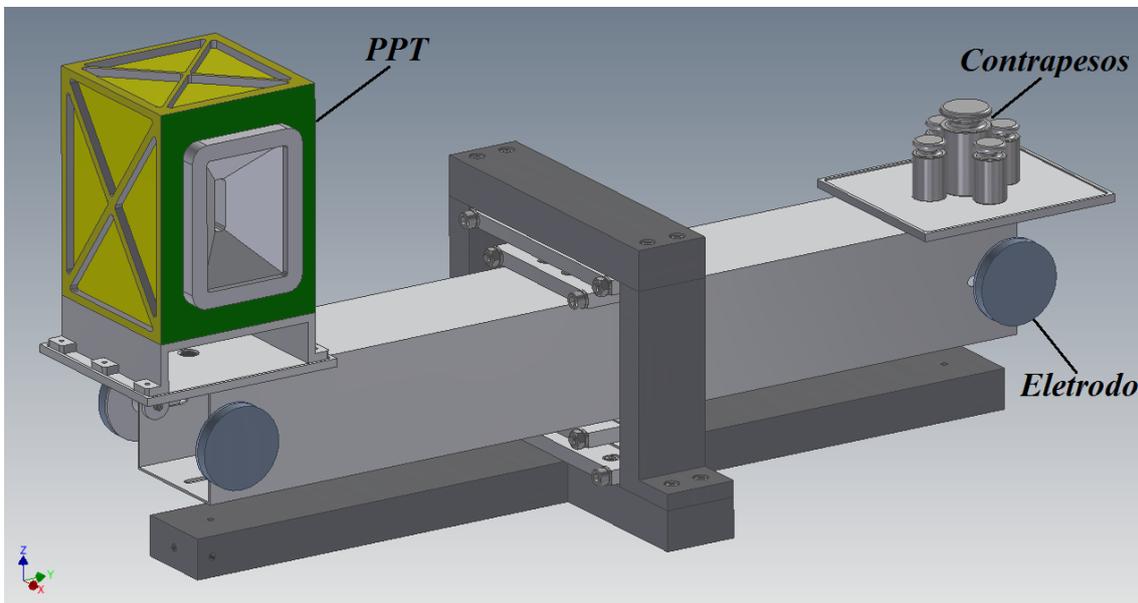


Braço tubular de alumínio (superior), estrutura em aço inox com os pivôs de torção (meio), braço da balança fixado na estrutura através dos pivôs de torção (inferior).

Fonte: Produção do autor.

Sobre o braço da balança de empuxo (em suas extremidades) serão colocados o propulsor a ser testado (*PPT*) e seu contrapeso, ambos equidistantes em relação ao eixo de rotação (pivôs). Essa disposição, vista na Figura 2.2, é utilizada para anular possíveis desequilíbrios em relação ao eixo de rotação devido à ação da força gravitacional. A Figura 2.2 mostra também os discos (eletrodos) do Dispositivo de Calibração Eletrostática (*DCE*) utilizados para simular alguns valores de empuxo de *PPTs* que serão aplicados para o cálculo dos parâmetros de desempenho da balança.

Figura 2.2 - Balança de empuxo com o *PPT* a ser testado, seu contrapeso e os eletrodos do *DCE*.



Fonte: Produção do autor.

2.2 Os pivôs de torção

Conforme descrito na seção anterior (2.1) a balança de empuxo utiliza dois pivôs de torção, um sobre o braço da balança e outro abaixo dele devidamente alinhados formando assim o eixo de rotação. Esses elementos possuem função elástica e restauradora, equivalente à mola de um sistema massa-mola, ou seja, uma “mola de torção”. Foram escolhidos porque são relativamente simples, compatíveis com vácuo, possuem alta repetibilidade e baixíssima histerese para pequenos deslocamentos an-

gulares (α) (RIVERHAWK, 2016) que sofrem devido aos valores de empuxo dos *PPTs* (μN). Os pivôs de torção utilizados são os modelos de aço inoxidável da série 5000 da *Riverhawk Company*, mostrados na Figura 2.3 (vista externa e corte mostrando as lâminas internas).

Figura 2.3 - Pivôs de torção da série 5000 da *Riverhawk Company*.



Vista externa (esquerda), corte mostrando as lâminas internas (direita).

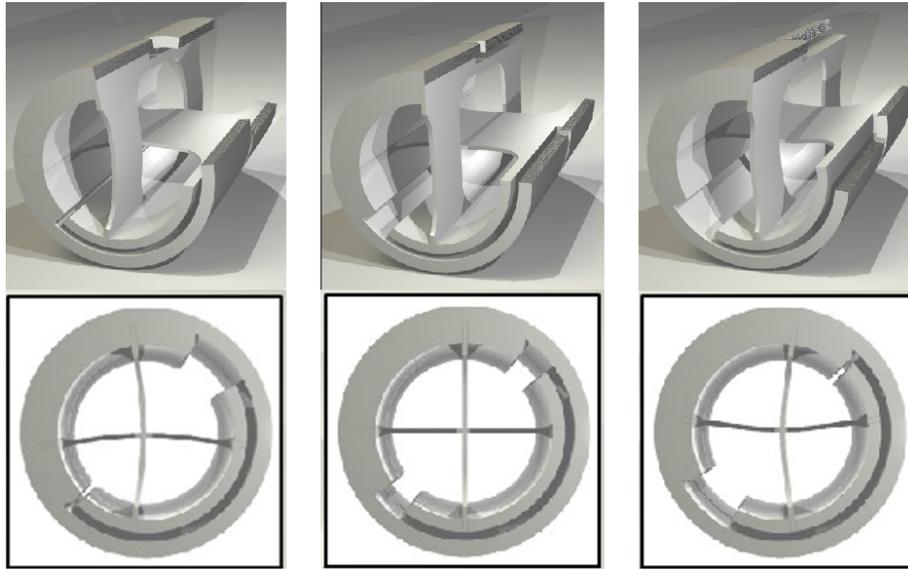
Fonte: Adaptado de (RIVERHAWK, 2016).

Fisicamente os pivôs de torção são constituídos de três pequenas lâminas perpendiculares entre si que são defletidas quando submetidas à uma torção. A Figura 2.4 mostra a deflexão interna das lâminas de um pivô da série 5000 da *Riverhawk Company* em três momentos distintos: o de máxima torção no sentido anti-horário, o de repouso e o de máxima torção no sentido horário. As lâminas encontram-se perpendiculares entre si durante o repouso.

As constantes elásticas de torção desses pivôs variam de acordo com o seu diâmetro e comprimento possuindo valores na faixa de 0,0013 a 48,6901 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, suportando uma carga axial de 2,7 a 712,1 kg, respectivamente, conforme mostra a Tabela 2.1 (RIVERHAWK, 2016).

A constante elástica de torção, κ , possui unidade de $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ (no SI), ou seja, se uma força (\vec{F}) for aplicada perpendicularmente à uma haste de peso desprezível, à uma distância l do ponto onde a haste é fixada ao pivô de torção (eixo), fará com que a haste sofra um deslocamento angular α conforme a equação a seguir:

Figura 2.4 - Deflexão interna do pivô de torção da série 5000 da *Riverhawk Company*.



Pivô de torção com máxima torção no sentido anti-horário (esquerda), em repouso (meio), com máxima torção no sentido horário (direita).

Fonte: Adaptado de (RIVERHAWK, 2016).

$$\kappa = \frac{F \cdot l}{\alpha} \quad (2.1)$$

Ou seja, uma força de 1 N aplicada à uma distância de 1 m em relação ao pivô de torção (eixo) deslocará a haste de um ângulo de 1 rad se o pivô tiver uma constante elástica de torção de 1 N·m/rad.

A Equação 2.1 não leva em conta a massa da haste e portanto, o seu momento de inércia, o que não seria adequado para uma boa estimativa da constante elástica de torção a ser utilizada na balança que possui: um braço de alumínio com massa não desprezível (≈ 655 g), os eletrodos do dispositivo de calibração eletrostática (≈ 208 g), os suportes para apoiar o propulsor e o contrapeso (≈ 176 g), os quais constituem o momento de inércia do conjunto formado pelo braço da balança, eletrodos do DCE e suportes ($\approx 4,38378 \times 10^{-2}$ kg·m²), e ainda a massa do propulsor (≈ 1381 g para o *DD-PPT X2*) e do seu contrapeso (idealmente a mesma massa do propulsor), o que dificulta ainda mais o movimento do braço da balança. Portanto, levando-se em conta o momento de inércia do conjunto (massa do braço da balança, DCE e suportes), a constante elástica de torção pode ser estimada através da análise

Tabela 2.1 - Parâmetros dos pivôs de torção da série 5000 da *Riverhawk Company*.

Diâmetro do pivô (mm)	Constante elástica de torção (N·m/rad)	Capacidade de carga axial (kg)	Número do modelo (Série 5000)
3,1750	0,0906	11,1	5004-400
	0,0110	5,6	5004-600
	0,0013	2,7	5004-800
3,9675	0,1806	17,5	5005-400
	0,0227	8,8	5005-600
	0,0026	4,4	5005-800
4,7625	0,3062	25,6	5006-400
	0,0369	12,6	5006-600
	0,0240	11,1	5006-660
	0,0045	6,3	5006-800
6,3500	0,7388	44,9	5008-400
	0,0926	22,4	5008-600
	0,0116	11,2	5008-800
7,9375	1,4465	69,9	5010-400
	0,1852	35,1	5010-600
	0,0233	17,6	5010-800
9,5250	2,4863	101,1	5012-400
	0,3108	50,8	5012-600
	0,0375	25,1	5012-800
12,700	5,8791	177,8	5016-400
	0,7342	88,9	5016-600
	0,0919	44,4	5016-800
15,875	11,9783	279,0	5020-400
	1,5028	139,7	5020-600
	0,1910	70,3	5020-800
19,050	20,5897	401,0	5024-400
	2,5769	200,5	5024-600
	0,3237	100,2	5024-800
25,400	48,6901	712,1	5032-400
	6,0798	356,1	5032-600
	0,7608	177,8	5032-800

Fonte: Adaptado de (RIVERHAWK, 2016).

que será feita a seguir.

A partir da Equação 1.25 que mostra o deslocamento angular ($\alpha(t)$) sofrido pelo braço da balança ao ser aplicada uma força (\vec{F}) perpendicular ao braço à uma distância r_F do eixo de rotação (pivô), considerando-se o momento de inércia total (J_T) dado pela soma do momento de inércia do conjunto formado pela massa do

braço da balança, eletrodos do DCE e suportes (J_C), com o momento de inércia do PPT (J_{PPT}) e do contrapeso (J_{CP}) (idealmente iguais: $J_{PPT} = J_{CP}$), a amplitude máxima (α_{max}) devido ao impulso máximo (I_{max}) será:

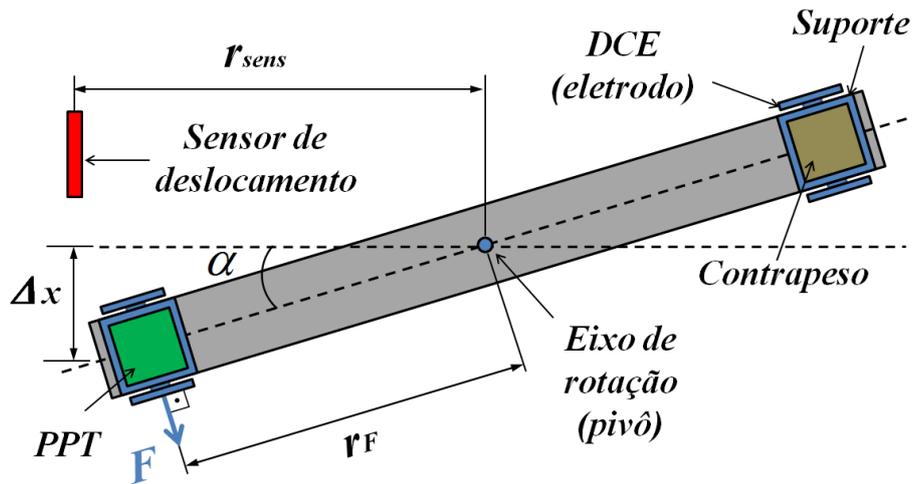
$$\alpha_{max} = \frac{r_F I_{max}}{J_T \omega} \quad (2.2)$$

Desprezando-se o termo $(\lambda/2J)^2$ da Equação 1.28 (pois o coeficiente de amortecimento, λ , dos pivôs de torção é muito pequeno ($(\lambda/2J)^2 \approx 0,00024$ (CIARALLI et al., 2013)) a velocidade angular (ω), obtida da Equação 1.27, pode ser substituída na Equação 2.2 fornecendo:

$$\sqrt{\frac{k}{(J_C + 2J_{PPT})}} = \frac{r_F I_{max}}{(J_C + 2J_{PPT}) \alpha_{max}} \quad (2.3)$$

Um sensor de deslocamento posicionado à uma determinada distância (r_{sens}) em relação ao eixo de rotação da balança medirá o deslocamento linear máximo (Δx_{max}) sofrido pelo braço numa configuração mostrada na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Vista superior do braço da balança de empuxo com o sensor de deslocamento (fora de escala).



Fonte: Produção do autor.

Considerando-se pequenos ângulos de deslocamento (α) tem-se:

$$tg\alpha_{max} = \frac{\Delta x_{max}}{r_{sens}} \cong \text{sen}\alpha_{max} \cong \alpha_{max} \Rightarrow \alpha_{max} \cong \frac{\Delta x_{max}}{r_{sens}} \quad (2.4)$$

Substituindo-se α_{max} da Equação 2.4 na Equação 2.3 e rearranjando-se os termos obtém-se:

$$\frac{(r_F)^2(I_{max})^2(r_{sens})^2}{(\Delta x_{max})^2} = \kappa\{J_C + 2[m_{PPT}(r_F)^2]\} \quad (2.5)$$

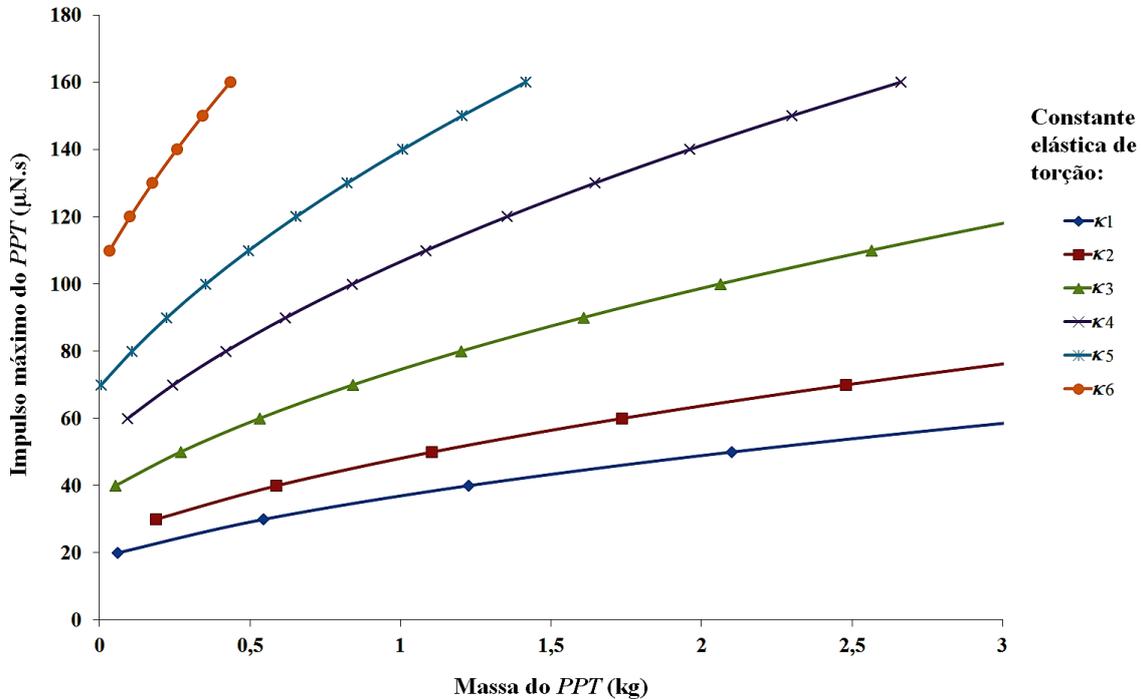
Através da Equação 2.5 obteve-se o gráfico da Figura 2.6, que mostra os valores de impulso máximo em função da massa do *PPT* para diferentes valores de constante elástica de torção κ_i , ($i = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6). Os valores de κ_i foram escolhidos aleatoriamente da Tabela 2.1 e são mostrados na Tabela 2.2. O impulso máximo (mostrado no eixo das ordenadas do gráfico da Figura 2.6) é aquele obtido quando o deslocamento do braço da balança de empuxo atinge o máximo valor da região linear do sensor óptico ($10 \mu\text{m}$). Seus valores (20 a $150 \mu\text{N}\cdot\text{s}$) correspondem aos impulsos típicos dos *PPTs* sob investigação. O momento de inércia do conjunto (J_C) foi obtido pelo *AutoDesk Inventor*[®] *Professional 2016* versão educacional.

Para um determinado *PPT* de massa m que deverá ser testado na balança de empuxo que possua uma constante elástica de torção κ_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$ ou 6), o gráfico da Figura 2.6 fornece o máximo valor de impulso do *PPT* para que o sensor de deslocamento não ultrapasse o limite superior da sua região linear de operação. *PPTs* com massas maiores terão maiores momentos de inércia (J_{PPT}) e a frequência natural da balança de empuxo, mostrada na Equação 2.6, irá diminuir, até que seja muito pequena e difícil de se medir de forma adequada. Diminuindo-se a massa do *PPT*, diminui-se seu momento de inércia (J_{PPT}) e o limite de teste de impulso permitido pela mesma balança de empuxo também deverá ser menor para que não se exceda a região linear de medição do sensor de deslocamento.

$$f_{nat} = \frac{\sqrt{\kappa/(J_C + 2J_{PPT})}}{2\pi} \quad (2.6)$$

Os valores apresentados na Tabela 2.2 e utilizados na Equação 2.5 são teóricos e o gráfico da Figura 2.6 tem o objetivo apenas de fornecer uma estimativa de qual valor da constante elástica de torção seria mais adequado para cada tipo de *PPT* a

Figura 2.6 - Impulso máximo do *PPT* em função da sua massa para diferentes valores de constante elástica de torção (κ_i) da balança de empuxo.



Os valores de κ_i e dos demais parâmetros utilizados para as curvas encontram-se na Tabela 2.2).

Fonte: Produção do autor.

ser testado.

Observando-se as curvas do gráfico da Figura 2.6, escolheu-se o valor de κ_3 para os pivôs da balança de empuxo (**modelo 5016-600**), em destaque na Tabela 2.1. A escolha foi feita com base nas características do *DD-PPT X2* que deverá ser utilizado na balança para testes (massa de 1,381 kg e impulso devido ao empuxo eletromagnético de 47,4 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ (MARIN, 2014)). Portanto, espera-se que o impulso total (eletromagnético e gás dinâmico) desse propulsor seja maior do que 50 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ o que, de acordo com a curva k_3 do gráfico da Figura 2.6, manteria o sinal do sensor de deslocamento linear (Δx) dentro da sua região linear de operação. Pela Equação 2.5, para o *DD-PPT X2* com um impulso de 50 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ o valor máximo de Δx é de $\approx 5,912 \mu\text{m}$, ou seja dentro da região linear (cerca de 10 μm de amplitude).

Tabela 2.2 - Valores dos coeficientes escolhidos para a balança de empuxo em desenvolvimento, que foram utilizados na Equação 2.5 para o gráfico da Figura 2.6.

Coeficiente	Descrição	Valor
r_F	Distância do ponto de aplicação da força \vec{F} ao eixo de rotação.	0,265 m
r_{sens}	Distância do sensor ao eixo de rotação.	0,265 m
Δx_{max}	Máximo deslocamento linear medido pelo sensor na sua região linear de operação.	10 μm
J_C	Momento de inércia do conjunto formado pela massa do braço da balança, eletrodos do DCE e suportes.	$4,6229363 \times 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
κ_1	Constante elástica de torção dos 2 pivôs modelo (5005-400)	0,3612 ($2 \times 0,1806$) N·m/rad
κ_2	Constante elástica de torção dos 2 pivôs modelo (5006-400)	0,6124 ($2 \times 0,3062$) N·m/rad
κ_3	Constante elástica de torção dos 2 pivôs modelo (5016-600)	1,4684 ($2 \times 0,7342$) N·m/rad
κ_4	Constante elástica de torção dos 2 pivôs modelo (5020-600)	3,0056 ($2 \times 1,5028$) N·m/rad
κ_5	Constante elástica de torção dos 2 pivôs modelo (5024-600)	5,1538 ($2 \times 2,5769$) N·m/rad
κ_6	Constante elástica de torção dos 2 pivôs modelo (5016-400)	11,7583 ($2 \times 5,8791$) N·m/rad

Fonte: Produção do autor.

2.3 O sensor de deslocamento linear - sensor óptico

A configuração da balança de empuxo como um pêndulo de torção utilizada na medição de pequenos empuxos (μN) e o comprimento limitado do braço da balança fazem com que seu deslocamento linear (Δx) seja micrométrico. O uso de um sensor de deslocamento linear óptico da *Philtec Inc.* permite esse tipo de medição. A Tabela 2.3 mostra os modelos D de sensor óptico de deslocamento da *Philtec Inc.* e suas características (faixas de medição linear e a resolução da medida).

Observando-se os modelos de sensores ópticos apresentados na Tabela 2.3 nota-se que existem duas regiões distintas de operação para cada modelo: uma “região próxima”

Tabela 2.3 - Modelos D de sensor óptico da *Philtec Inc.* e suas características.

Modelo do sensor	Faixa de medição total (mm)	Faixa de medição na região próxima (mm)	Faixa de medição na região distante (mm)	Resolução da medição na região próxima - DC - 20 kHz (μm)	Resolução da medição na região distante - DC - 20 kHz (μm)
D6	1	0,2	0,8	0,25	1,5
D12	2	0,25	1,75	0,06	0,6
D20	1,27	0,12	1,15	0,01	0,1
D21	2	0,25	1,75	0,05	0,8
D47	5	0,3	4,7	0,04	0,9
D63	3	0,15	2,85	0,013	0,3
D64	6	0,2	5,8	0,03	1
D100	10	0,4	9,6	0,03	1,9
D125	15	0,4	14,6	0,013	0,9
D169	20	0,5	19,5	0,05	5
D170	30	0,9	29,1	0,08	7
D171	50	9,5	40,5	2	7
D240	76	14	62	3	8

Fonte: Adaptado de (PHILTEC INC., 2016).

e outra “região distante”. Cada uma delas possui sua faixa de operação e resolução característica. Para a balança de empuxo com deslocamento micrométrico o sensor escolhido deverá operar em sua “região próxima”, ou seja, em uma faixa menor (micrométrica) com uma resolução menor (maior sensibilidade). Os modelos D20 e D63 possuem as menores faixas de medição na “região próxima” (120 μm e 150 μm , respectivamente) com as melhores resoluções (0,01 μm e 0,013 μm , respectivamente). No entanto, os gráficos fornecidos pelo fabricante (*Philtec Inc.*) mostram uma região linear de operação maior para o modelo D63 (17,8 a 43,2 μm) e menor para o modelo D20 (16,8 a 34,8 μm) (PHILTEC INC., 2016).

Portanto, o valor de Δx seria de $\pm 12,7 \mu\text{m}$ para o modelo D63 e de $\pm 9,0 \mu\text{m}$ para o modelo D20. Por esse motivo o modelo de sensor óptico escolhido para ser usado na balança de empuxo foi o **D63**. O sensor modelo D63-B(Bv2)C1E3 número de série 2904 *Tip* 4130 apresentou uma região linear de operação de 22,1 a 42,2 μm (Δx de $\pm 10,05 \mu\text{m}$) com uma sensibilidade de 84,426 mV/ μm , segundo a curva de calibração fornecida pelo fabricante.

Esse tipo de sensor funciona através do envio de um sinal de luz por um cabo de fibra

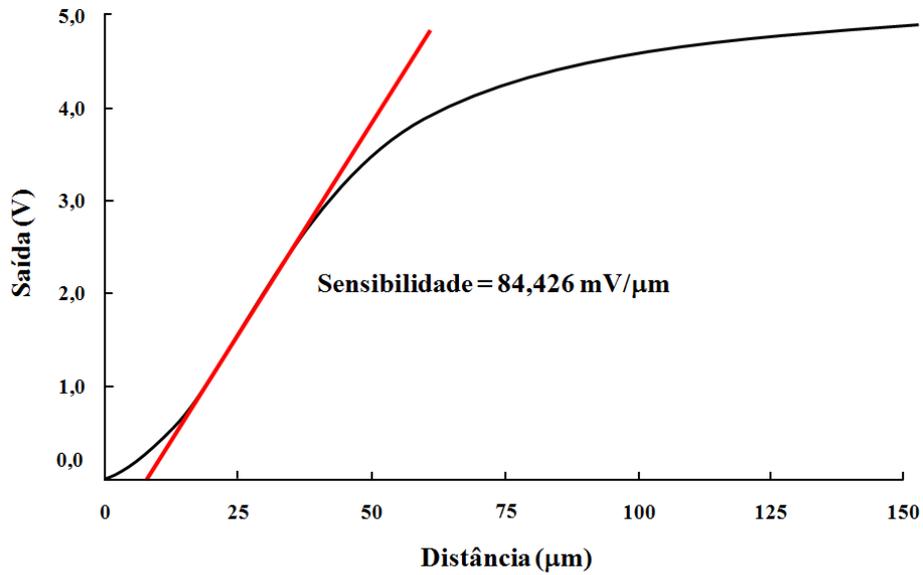
óptica para um alvo (disco) refletivo, que deverá estar preso ao braço da balança de empuxo à uma certa distância (r_{sens}) em relação ao eixo de rotação. A unidade eletrônica de controle do sensor fornece um sinal de saída (em tensão DC) de 0 a 5 V que é em função da quantidade de luz refletida, o que permite a obtenção da distância entre o alvo e a ponta do cabo de fibra óptica (que enviou o sinal). O sinal de saída (0 a 5 V) pode ser lido, por exemplo, por um osciloscópio digital (utilizou-se o modelo TDS5034B da *TEKTRONIX* ([TEKTRONIX INC., 2005](#)) para visualização do sinal de saída do sensor). A distância é obtida através da curva de calibração (tensão em função da distância) que é fornecida pelo fabricante.

Além da medida do deslocamento do braço da balança, o sensor óptico permitirá a obtenção do tempo de amortecimento, da frequência de oscilação natural da balança de empuxo e também o cálculo do momento de inércia do braço.

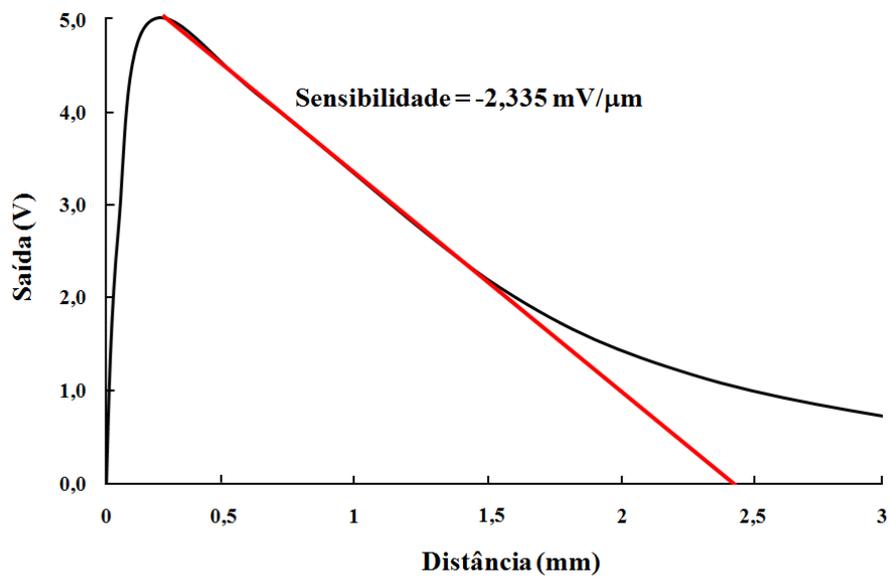
A Figura 2.7 mostra as curvas da tensão de saída em função da distância entre o alvo e o sensor óptico de deslocamento modelo D63 número de série 2904 *Tip* 4130 da *Philtec Inc.* para suas duas regiões lineares de funcionamento. Na “região próxima” a variação do sinal de saída é maior (sensibilidade = $84,426 \text{ mV}/\mu\text{m}$) portanto, a tensão de saída cresce rapidamente para um pequeno aumento da distância entre o alvo refletivo (disco) e a ponta do sensor. Esse aumento na tensão de saída continua até atingir um valor máximo (5 V) e entra na “região distante”, onde a variação do sinal de saída é menor (sensibilidade = $-2,335 \text{ mV}/\mu\text{m}$) e por isso a tensão decresce mais suavemente com o aumento da distância ([PHILTEC INC., 2016](#)).

A partir do gráfico da “região próxima” do sensor e dos seus limites inferior e superior (22,1 e $42,2 \mu\text{m}$, respectivamente), que é a curva linear em vermelho mostrada no gráfico superior da Figura 2.7, o sensor deverá ser posicionado no centro dessa região linear de operação para que a balança de empuxo possa oscilar em torno desse ponto central variando sua amplitude de $\pm \Delta x$.

Figura 2.7 - Curvas da tensão de saída em função da distância entre o alvo e o sensor óptico de deslocamento modelo D63 (número de série 2904 *Tip* 4130) da *Philtec Inc.*



Faixa Linear "Região Próxima" $\pm 1\% = 22,1$ a $42,2 \mu\text{m}$



Faixa Linear "Região Distante" $\pm 1\% = 0,24$ a $1,19 \text{ mm}$

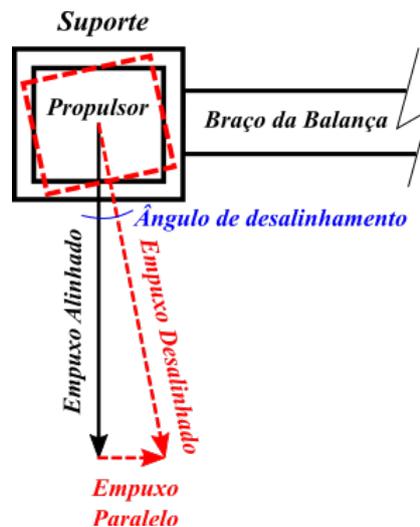
Curva do sensor D63 na "região próxima" (acima), e na "região distante" (abaixo).

Fonte: Adaptado de (PHILTEC INC., 2016).

2.4 Suportes para apoio do *PPT* e do contrapeso

Os suportes são utilizados para apoiar o propulsor e o contrapeso e também permitir a fixação correta do *PPT*, a fim de que esse propulsor não fique desalinhado em relação ao braço da balança. A balança configurada como um pêndulo de torção mede apenas a componente do empuxo perpendicular ao seu braço e se o propulsor estiver desalinhado uma pequena parcela do empuxo (empuxo paralelo) não será medida (CIARALLI et al., 2013). O alinhamento deve ser feito considerando-se o vetor empuxo no centro geométrico do propulsor. A Figura 2.8 mostra o braço da balança com as componentes do empuxo e o ângulo de desalinhamento, que deve ser evitado. Para os testes com os eletrodos do DCE, que aplicarão uma força de empuxo na balança, o vetor empuxo deverá ser considerado no centro do disco (eletrodo do DCE) e perpendicular à sua superfície.

Figura 2.8 - Componentes do empuxo e ângulo de desalinhamento em relação ao braço da balança



Fonte: Produção do autor.

2.5 Dispositivo de Calibração Eletrostática - DCE

O dispositivo de calibração eletrostática é um aparato que utiliza dois discos de alumínio (eletrodos) de diâmetros diferentes, dispostos numa configuração semelhante a um capacitor de placas paralelas onde a distância entre as placas pode ser ajustada (foi usada uma base deslizante linear acoplada à um micrômetro que permitiu

o ajuste). Quando uma diferença de potencial (d.d.p.) é aplicada entre os discos (eletrodos) surge uma força de atração entre eles que pode ser medida por uma balança analítica de precisão. Essa força será diretamente proporcional à área do disco (eletrodo menor, A_E) e ao quadrado da tensão aplicada (U) e inversamente proporcional ao quadrado da distância de separação entre os eletrodos (D_E) (HALLIDAY et al., 1993), conforme mostra a Equação 2.7 a seguir:

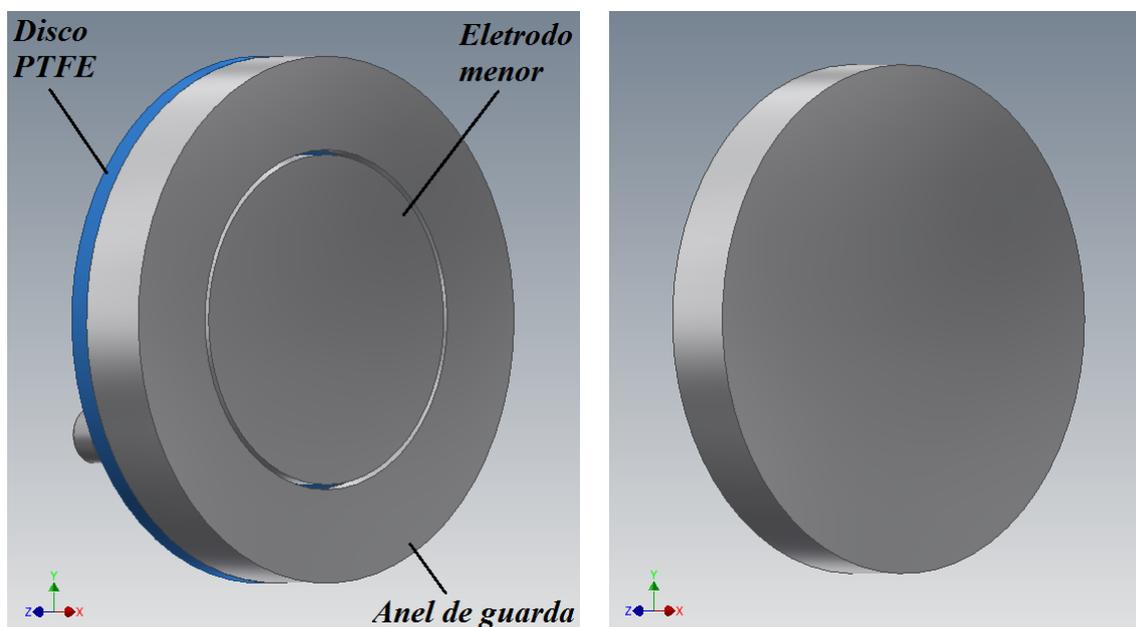
$$F_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{U}{D_E} \right)^2 A_E \quad (2.7)$$

A Figura 2.9 ilustra os discos (eletrodos) do DCE. Nela pode-se observar o disco menor (eletrodo que possui um anel de guarda confeccionado também em alumínio, para diminuir os efeitos de borda devido à disposição dos eletrodos como um capacitor de placas paralelas) e o disco maior (eletrodo que será acoplado ao braço da balança de empuxo). Um disco de PTFE é utilizado para isolar eletricamente o eletrodo menor do anel de guarda, pois eles deverão ter potenciais elétricos diferentes. No eletrodo menor será aplicado o potencial positivo e no anel de guarda e no eletrodo maior será aplicado o potencial negativo da fonte de tensão (utilizou-se uma fonte digital da *Keithley Instruments, Inc.* modelo 6517A (KEITHLEY INSTRUMENTS, INC., 2016)). Entre o eletrodo menor e o anel de guarda existe uma pequena separação ($\sim 0,5$ mm) que deverá ser menor do que a distância de separação entre os eletrodos (D_E) para que os efeitos de borda sejam minimizados. Os diâmetros dos eletrodos (discos) menor e maior são de 31,80 mm e de 50,80 mm, respectivamente.

A função do DCE será permitir a calibração estática da balança de empuxo. Para isso, deve-se determinar a curva da força aplicada pelo DCE (F_E em μN) em função do deslocamento linear (Δx em μm) do braço da balança. A d.d.p. entre os eletrodos do DCE gera sua força eletrostática que pode ser medida em uma balança analítica de precisão. O sensor óptico, descrito no item 2.3 (através da sua curva linear, fornecida pelo fabricante), mede o deslocamento linear do braço devido à força eletrostática do DCE.

O DCE terá também a função de aplicar um impulso à balança (entre 20 e 150 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$). A largura do pulso de tensão deve ser a menor possível para que o braço da balança de empuxo não atinja seu valor máximo antes do final do pulso de tensão aplicado (permitindo que o pulso do DCE satisfaça as condições necessárias para validação das equações descritas no item 1.6.1). Caso contrário, a calibração seria estática (o sinal de tensão seria mantido até que a balança se estabilizasse e depois seria retirado,

Figura 2.9 - Discos (eletrodos) do DCE.



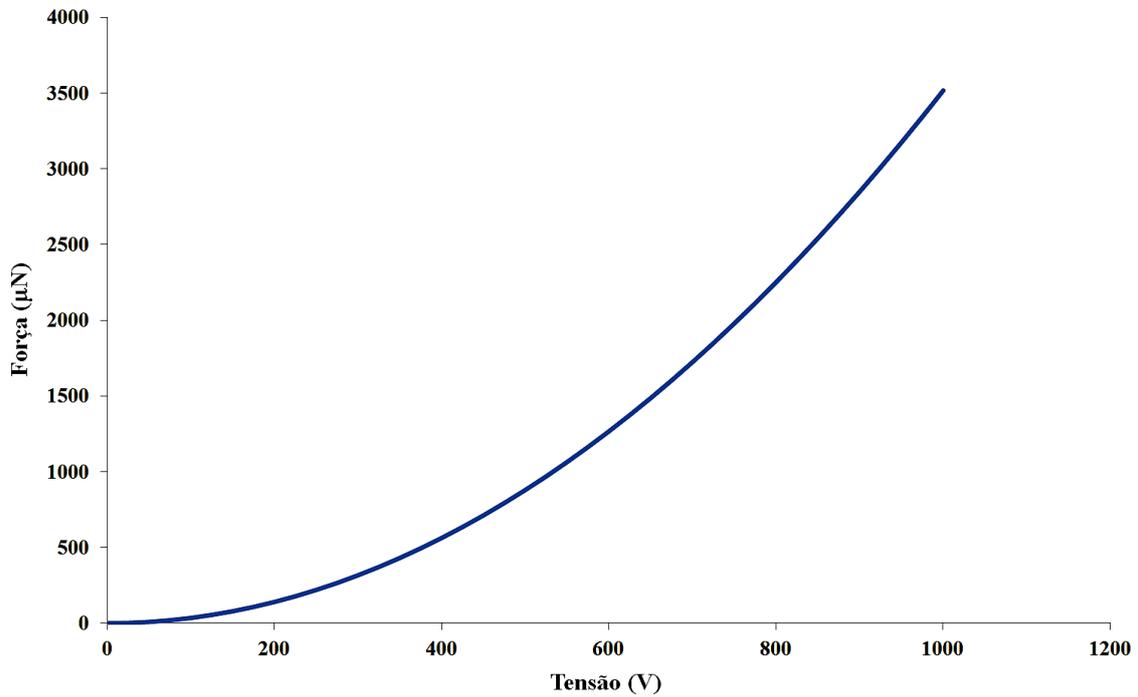
Eletrodo menor de alumínio (diâmetro de 31,80 mm), anel de guarda de alumínio e disco de PTFE para isolamento (esquerda), eletrodo maior de alumínio (diâmetro de 50,80 mm) (direita).

Fonte: Produção do autor.

permitindo a oscilação).

Uma balança analítica de precisão (utilizou-se a balança analítica *Shimadzu* modelo AUY220 com capacidade máxima de 200 g e resolução de 0,1 mg (SHIMADZU ANALYTICAL AND MEASURING INSTRUMENTS, 2008)), permitirá a calibração do DCE para que se obtenha a curva da força elétrica entre os eletrodos em função da tensão aplicada (d.d.p.) entre eles, conforme mostra o gráfico da Figura 2.10, que corresponde à curva ideal da calibração do DCE e foi construído utilizando-se a Equação 2.7 e os valores dos coeficientes mostrados na Tabela 2.4.

Figura 2.10 - Curva ideal da calibração do DCE.



Equação da curva: $F_E = 3,517 \times 10^{-3}(U)^2$

Fonte: Produção do autor.

Tabela 2.4 - Valores dos coeficientes utilizados na Equação 2.7 para a curva da Figura 2.10.

Coefficiente	Descrição	Valor
ϵ_0	Constante de Permissividade ou Constante Dielétrica no Vácuo ¹ .	$8,8541878176... \times 10^{-12}$ F/m
ϵ_r	Constante de Permissividade Relativa do Ar ² .	1,00059
U	Diferença de potencial (d.d.p.) entre os eletrodos.	0 a 1000 V
D_E	Distância entre os eletrodos.	0,001 m
A_E	Área do eletrodo menor.	$7,94 \times 10^{-4}$ m ² /N·m ²

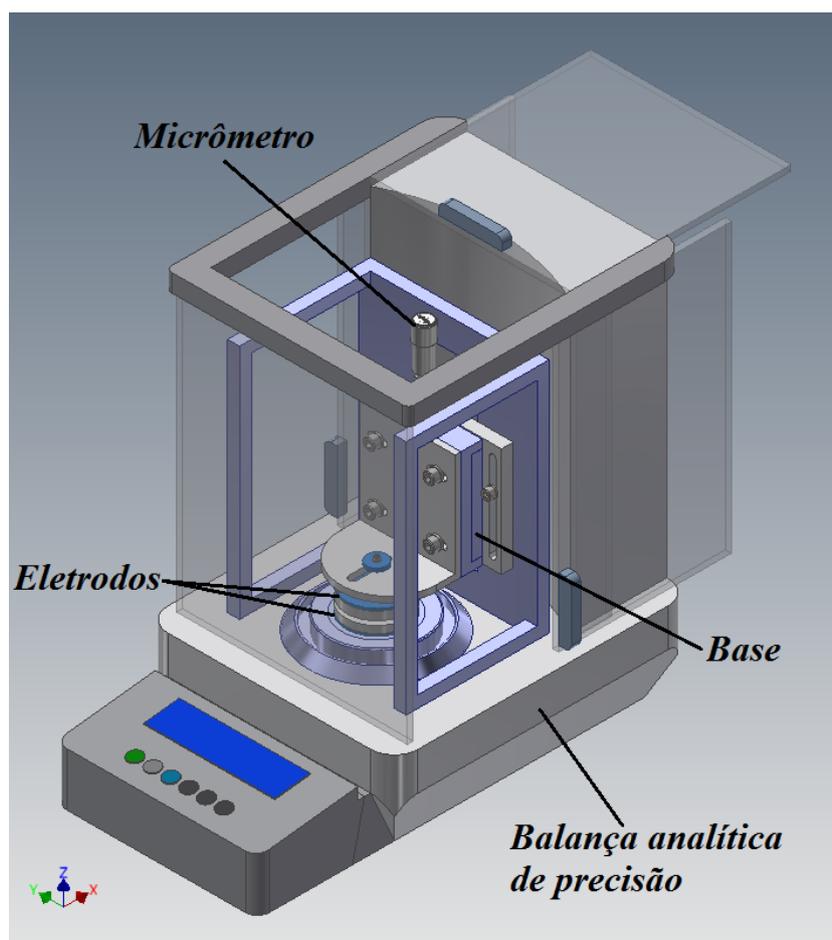
Fonte: Produção do autor.

¹Fonte: (SOCIEDADE PORTUGUESA DE QUÍMICA (SPQ), 1990)

²Fonte: (LABORATÓRIO DE MATERIAIS (LAMAT), 2015)

A montagem do DCE para sua calibração com a balança analítica de precisão foi feita colocando-se o eletrodo maior sobre o prato da balança analítica e o eletrodo menor (com anel de guarda) montado paralelamente sobre o eletrodo maior, através de uma base com um micrômetro (micrômetro *Mitutoyo* com resolução de $10\ \mu\text{m}$) que permitiu o ajuste da distância (D_E) entre os eletrodos. A aproximação dos eletrodos foi realizada até que houvesse o contato entre eles. Depois afastou-se o eletrodo menor, medindo-se com o micrômetro a distância desejada de afastamento ($> 0,5\ \text{mm}$). Para o micrômetro utilizado, com resolução de $10\ \mu\text{m}$, cada volta completa em torno do seu eixo deslocou o eletrodo em $0,5\ \text{mm}$ com uma escala de leitura de $10\ \mu\text{m}$. A Figura 2.11 ilustra a disposição dos eletrodos sobre a balança analítica de precisão e a base com micrômetro para obtenção da curva de calibração do DCE.

Figura 2.11 - Eletrodos sobre a balança analítica de precisão para calibração do DCE.

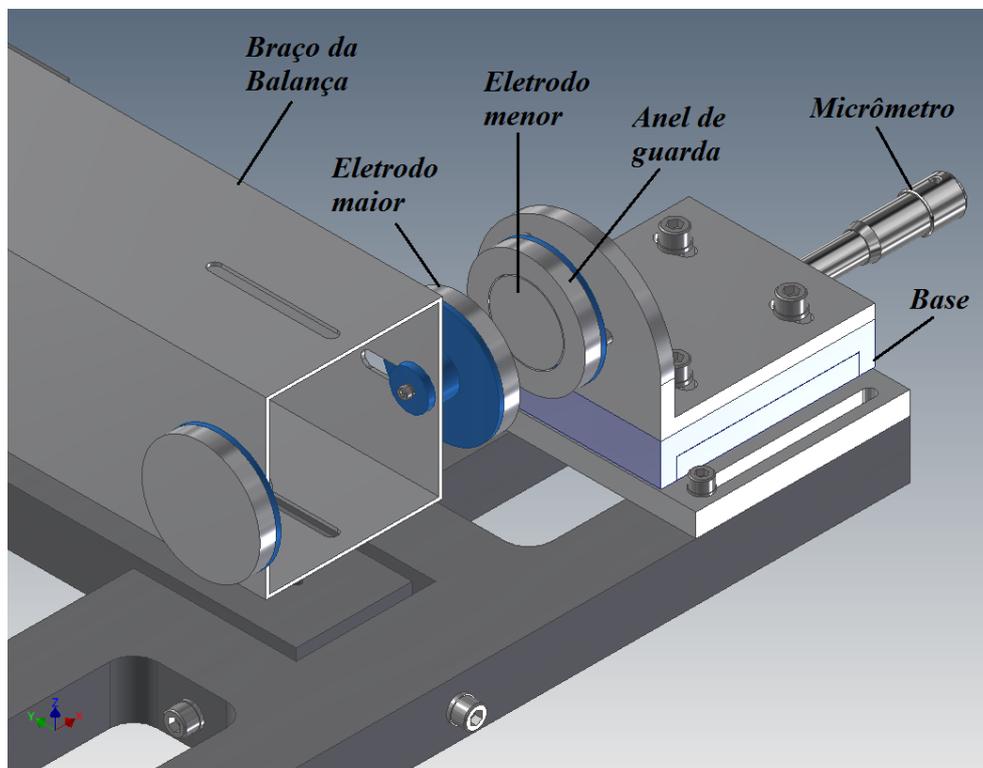


Fonte: Produção do autor.

O procedimento de montagem e ajuste dos eletrodos (montagem de forma que as superfícies dos eletrodos fiquem paralelas entre si e o ajuste da distância entre eles), realizado verticalmente sobre a balança analítica de precisão, foi rigorosamente repetido na montagem horizontal no braço da balança de empuxo, a fim de que se garantisse as mesmas condições de quando a calibração do DCE foi realizada.

A Figura 2.12 mostra o eletrodo maior do DCE montado no braço da balança de empuxo para aplicação da força e o eletrodo menor com anel de guarda posicionado sobre uma base com micrômetro para os ajustes.

Figura 2.12 - Eletrodos do DCE montados na balança de empuxo para aplicação da força.

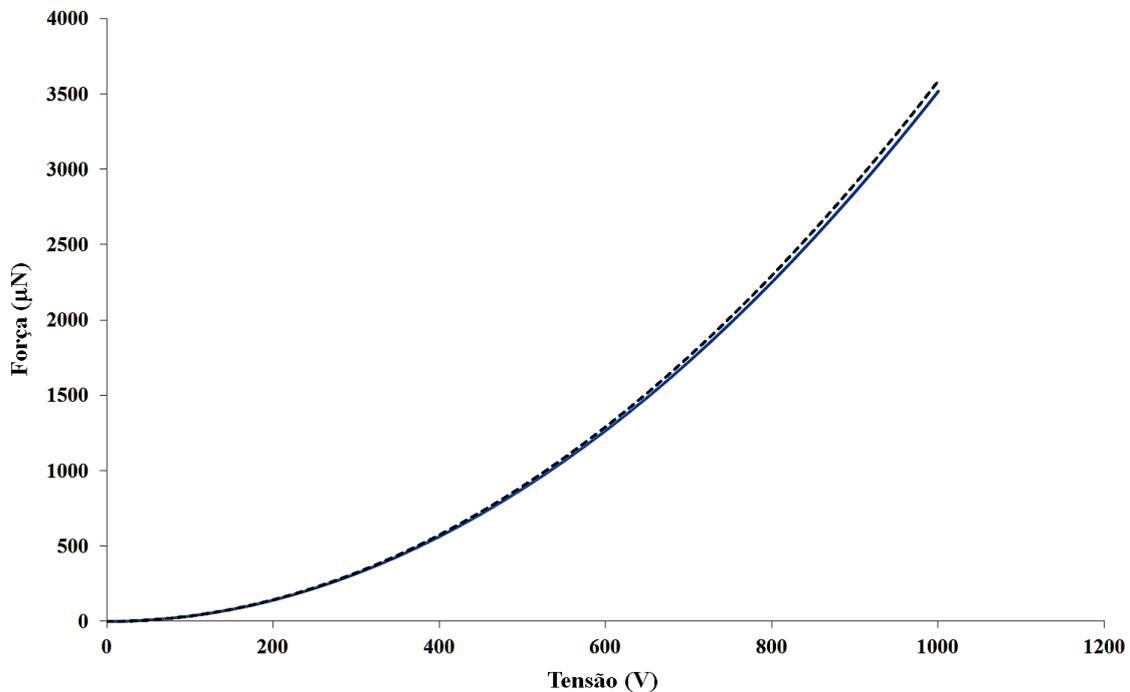


Fonte: Produção do autor.

Na montagem do DCE na balança analítica de precisão, mostrada na Figura 2.11, a força eletrostática entre os eletrodos não causa variação da distância entre eles ($\Delta D_E = 0$). No entanto, na montagem dos eletrodos na balança de empuxo, Figura 2.12, a força eletrostática causará um pequeno deslocamento do braço da ba-

lança de empuxo ($\Delta D_E = 10 \mu\text{m}$, no máximo) que será medido pelo sensor. Esse deslocamento fará com que a distância entre os eletrodos (D_E) diminua, aumentando a força eletrostática (F_E é inversamente proporcional ao quadrado da distância D_E , conforme mostra a Equação 2.7) e diminuindo a distância novamente até que se atinja o equilíbrio devido à força contrária do pivô de torção. Essa diferença pode ser vista através do gráfico da Figura 2.13, que mostra as curvas teóricas das forças eletrostáticas em função da tensão aplicada entre os eletrodos do DCE para $D_E = 1 \text{ mm}$ (curva contínua em azul) e $D_E = 0,99 \text{ mm}$ (curva tracejada em preto).

Figura 2.13 - Curvas ideais das forças eletrostáticas para $D_E = 1 \text{ mm}$ e $D_E = 0,99 \text{ mm}$.



Equação da curva contínua (—) ($D_E = 1,00 \text{ mm}$): $F_E = 3,517 \times 10^{-3}(U)^2$, e equação da curva tracejada (- -) ($D_E = 0,99 \text{ mm}$): $F_E = 3,586 \times 10^{-3}(U)^2$.

Fonte: Produção do autor.

O aumento no valor da força eletrostática, $F_E(+)$, quando D_E varia de 1,00 mm para 0,99 mm (curvas do gráfico da Figura 2.13) pode ser calculado pela Equação 2.8. Para as curvas ideais o aumento percentual da força eletrostática foi de 1,99 %. $F_{D_E(0,99)}$ e $F_{D_E(1,00)}$ correspondem aos valores das forças devido à distância entre os eletrodos do DCE de 0,99 mm e 1,00 mm, respectivamente.

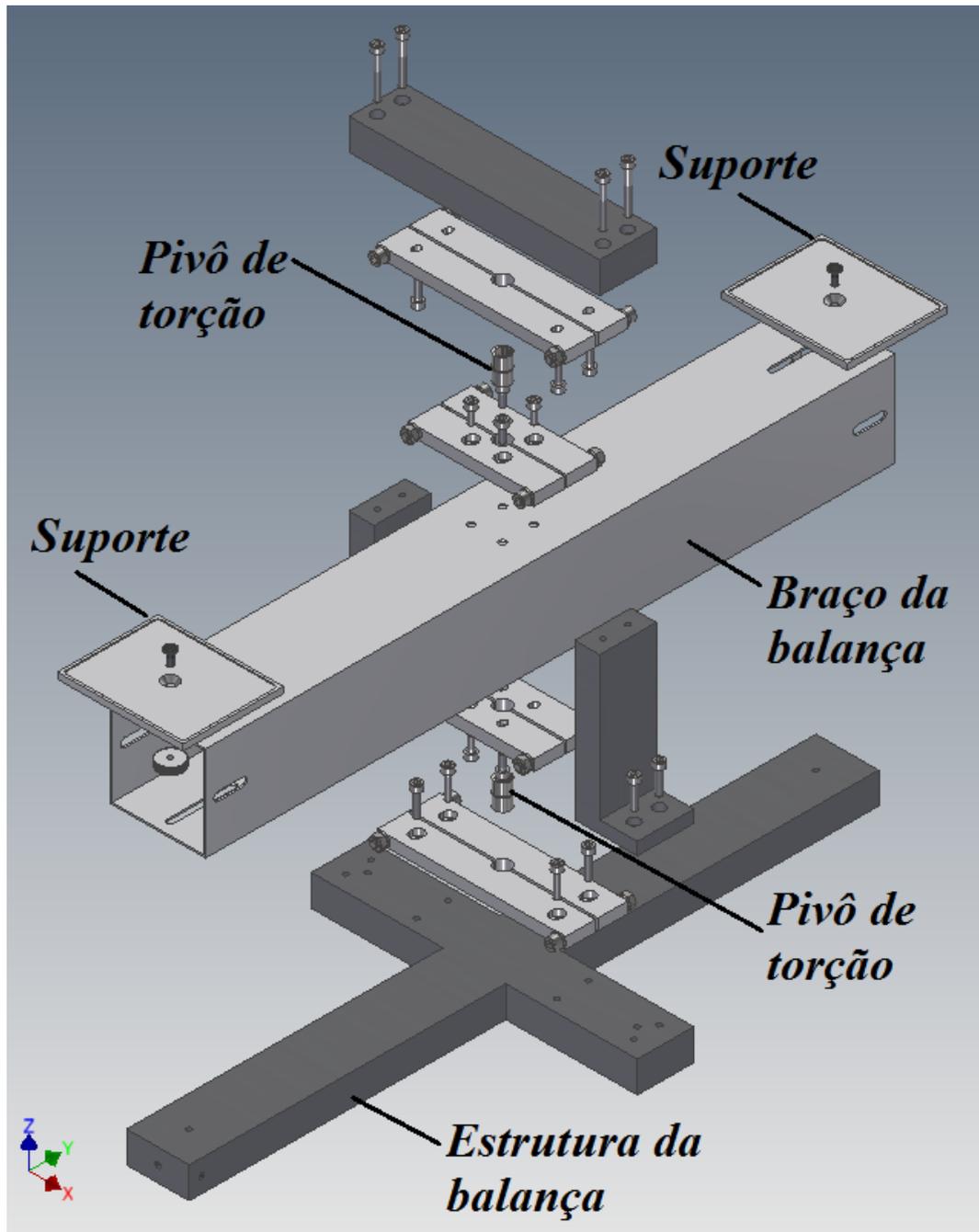
$$F_E(+) = \frac{F_{D_E(0,99)} - F_{D_E(1,00)}}{F_{D_E(1,00)}} \times 100 \quad (2.8)$$

Embora ocorra a variação de D_E e portanto, um aumento de $\approx 1,93\%$ no valor da força eletrostática, essa variação só afetará a calibração estática, pois a força aplicada quando se calcula o impulso não varia devido ao curto período de tempo em que o impulso ocorre, ou seja, antes do braço da balança de empuxo se deslocar e diminuir a distância entre os eletrodos (D_E) o sinal do impulso já terá terminado.

2.6 Montagem da balança de empuxo

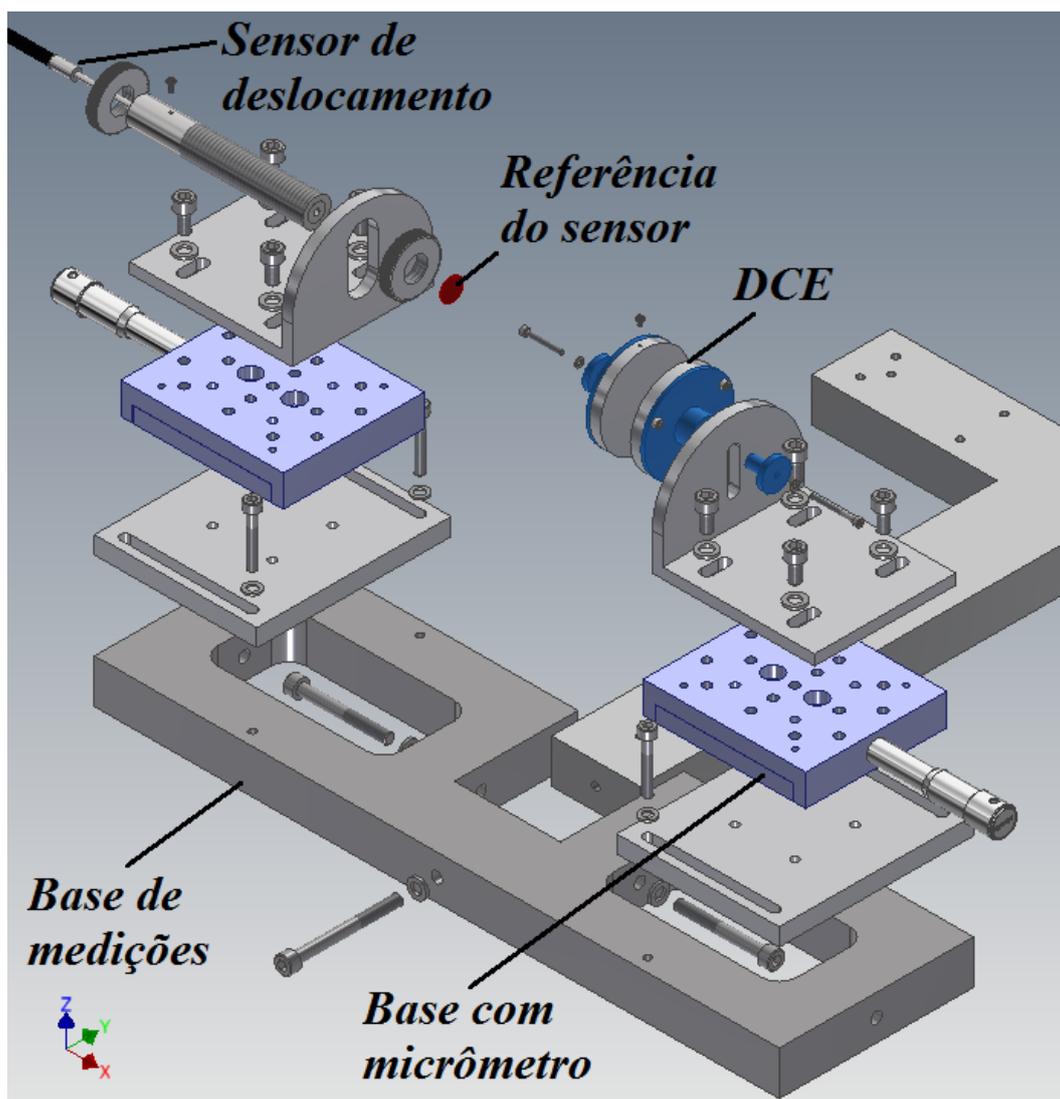
A balança de empuxo deverá ser montada integrando-se todos os elementos que a compõem tais como: estrutura de aço inox, braço da balança de alumínio, pivôs de torção e os suportes para os testes com o *PPT* e seu contrapeso, conforme mostra a Figura 2.14. Uma estrutura de aço inox foi adicionada para que os dispositivos de medição (sensor de deslocamento e DCE) pudessem ser fixados com o auxílio da base com micrômetro, conforme ilustra a Figura 2.15.

Figura 2.14 - Montagem da balança de empuxo: principais elementos.



Fonte: Produção do autor.

Figura 2.15 - Base de fixação do DCE e do sensor de deslocamento.



Fonte: Produção do autor.

3 METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DO IMPULSO

A largura do pulso aplicado com o uso do DCE (Δt) deve ser suficientemente pequena para que esse impulso (DCE) possa ser comparado com o medido pela balança (através da Equação 1.3) e para que o erro relativo entre eles esteja dentro da faixa típica desse tipo de balança de empuxo (12 a 15 %). Em um próximo trabalho a balança de empuxo deverá ser testada com o *DD-PPT*, a fim de que ela possa medir seu impulso total produzido.

As equações que determinam a dinâmica de um pêndulo de torção foram descritas em 1.6.1 e são válidas para forças com largura de pulso muito pequena (impulsos), ou seja, próximas às de um *PPT* (o *PPT* possui largura de pulso de poucos μs). Portanto, a Equação 1.26, que corresponde à solução da equação diferencial do pêndulo de torção (Equação 1.8), pode ser utilizada na obtenção do impulso gerado pelo *PPT* em teste. A dinâmica da balança de empuxo configurada como um pêndulo de torção é semelhante à equação do oscilador harmônico forçado (RESNICK; HALLIDAY, 1984) e conforme as considerações descritas em 1.6.1 é dada por:

$$J\ddot{\alpha}(t) + \lambda\dot{\alpha}(t) + \kappa\alpha(t) = T(t)r_T \quad (3.1)$$

A Equação 3.1 é uma equação diferencial de segunda ordem, onde $T(t)$ e r_T são a força de empuxo do *PPT* e a distância da aplicação do empuxo em relação ao eixo de rotação, respectivamente. Considerando-se que a força de empuxo do *PPT* ($T(t)$) terá um valor constante igual a T durante o intervalo de tempo em que será aplicada ($0 \leq t \leq t_{on}$) e será nula fora desse intervalo ($t > t_{on}$) produzindo um impulso (*impulse bit*, I_{bit}) igual à integral da força de empuxo (T) no intervalo de tempo em que é válida ($0 \leq t \leq t_{on}$), a amplitude máxima do deslocamento angular sofrido pelo braço da balança de empuxo será (SYMON, 1960):

$$\alpha_{max} = \frac{r_T I_{bit}}{J\omega_0} \quad (3.2)$$

A Equação 3.2 corresponde à Equação 1.24 (descrita no item 1.6.1) para $t_i = 0$, ou seja, considerou-se que o impulso I_i (da Equação 1.24) foi aplicado em $t = t_i = 0$. Dessa forma, a solução da Equação 3.1 para $t > t_{on}$ pode ser dada por (SYMON, 1960):

$$\alpha(t) = \frac{r_T I_{bit}}{J\omega_0} e^{-\left(\frac{\lambda}{2J}\right)(t)} \text{sen}(\omega_0 t) \quad (3.3)$$

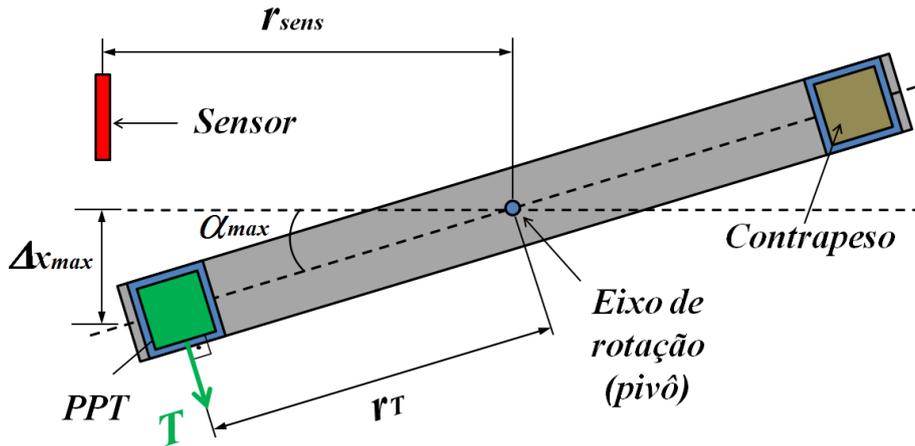
A Equação 3.3 corresponde à Equação 1.25 (descrita em 1.6.1) para $t_i = 0$, instante de aplicação do impulso.

Desprezando-se o amortecimento (devido ao baixo valor da constante de amortecimento, λ , dos pivôs de torção), a frequência natural (f_{nat}) do pêndulo de torção, em Hz, será (SYMON, 1960):

$$f_{nat} = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{\sqrt{\kappa/J}}{2\pi} \quad (3.4)$$

A Figura 3.1, apresentada a seguir, mostra a balança de empuxo com o *PPT* e seu contrapeso, ambos idealmente com a mesma massa e equidistantes em relação ao eixo de rotação da balança. Dessa forma, haverá equilíbrio estático do conjunto em relação ao eixo de rotação e a balança será deslocada (Δx_{max}) apenas devido à aplicação do impulso (I_{bit}) do propulsor.

Figura 3.1 - Vista superior do braço da balança de empuxo deslocado pelo impulso do *PPT* (fora de escala).



Fonte: Produção do autor.

Conforme mostrado na Equação 2.4, considerando-se que o braço da balança de empuxo tenha um ângulo de deslocamento (α) muito pequeno quando o impulso do

propulsor é aplicado e que o sensor da Figura 3.1 possa medir o deslocamento linear Δx (dentro da sua faixa linear de operação), tem-se:

$$\Delta x_{max} \cong r_{sens} \text{sen} \alpha_{max} \Rightarrow \Delta x_{max} \cong r_{sens} \alpha_{max} \quad (3.5)$$

Substituindo-se α_{max} da Equação 3.5 e ω_0 da Equação 3.4 na Equação 3.2 o impulso será:

$$I_{bit} = \frac{J 2\pi f_{nat} \Delta x_{max}}{r_T r_{sens}} \quad (3.6)$$

A Equação 3.6 mostra que o impulso (I_{bit}) aplicado pelo *PPT* ao braço da balança de empuxo pode ser determinado pela obtenção dos cinco seguintes coeficientes, listados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Coeficientes utilizados na Equação 3.6 para determinação do impulso (I_{bit}) do *PPT*.

Coeficiente	Descrição
J	Momento de inércia do conjunto (braço da balança de empuxo, suportes, <i>PPT</i> e contrapeso).
f_{nat}	Frequência natural da balança de empuxo.
Δx_{max}	Deslocamento linear máximo do braço da balança de empuxo medido pelo sensor.
r_T	Distância do ponto de aplicação da força de empuxo do <i>PPT</i> ao eixo de rotação.
r_{sens}	Distância do sensor ao eixo de rotação.

Fonte: Produção do autor.

3.1 Momento de inércia do conjunto

O momento de inércia do conjunto é a soma dos momentos de inércia do braço da balança de empuxo (J_b), dos quatro eletrodos do DCE (J_e) dos dois suportes (J_s), do *PPT* (J_{PPT}) e do seu contrapeso (J_{CP}). Os momentos de inércia do *PPT* (J_{PPT}) e do seu contrapeso (J_{CP}) podem ser calculados multiplicando-se suas massas

(m_i , representadas por pesos-padrão compactos) pelo quadrado da distância entre o centro geométrico do peso-padrão e o eixo de rotação da balança de empuxo (r_i), conforme mostra a Equação 3.7:

$$J_i = m_i r_i^2 \quad (3.7)$$

No entanto, o momento de inércia do braço da balança de empuxo, J_b , dos eletrodos do DCE (J_e) e dos suportes (J_s), (por possuírem dimensões não compactas e ocuparem posições não favoráveis) deverão ser obtidos através do coeficiente angular de uma curva experimental (CIARALLI et al., 2013), conforme descrito a seguir:

$$J = J_b + J_e + J_s + J_{PPT} + J_{CP} \quad (3.8)$$

Idealmente, os momentos de inércia do propulsor e do contrapeso devem ser iguais, ou seja, $J_{PPT} = J_{CP}$ e podem ser chamados de momento de inércia dos pesos, J_p . O momento de inércia dos eletrodos, J_e , e suportes, J_s , podem ser incorporados ao do braço da balança formando o momento de inércia J'_b ($J'_b = J_b + J_e + J_s$). Portanto, a Equação 3.8 torna-se:

$$J = J'_b + 2J_p \quad (3.9)$$

Da Equação 3.4 (frequência natural da balança de empuxo) pode-se obter o momento de inércia do conjunto e substituí-lo na Equação 3.9, resultando em:

$$\frac{\kappa}{\omega_0^2} = J'_b + 2J_p \rightarrow \underbrace{2J_p \omega_0^2}_y = \underbrace{-J'_b \omega_0^2}_{ax} + \underbrace{\kappa}_b \quad (3.10)$$

A Equação 3.10 mostra os coeficientes angular ($a = J'_b$) e linear ($b = \kappa$) de uma curva que pode ser obtida experimentalmente com a balança de empuxo. Para isso, vários pesos-padrão são utilizados para variar o momento de inércia do *PPT* e do seu contrapeso, mudando assim a frequência natural da balança (f_{nat}). O valor de cada frequência é obtido pelo cálculo da Transformada de Fourier do sinal de saída do sensor de deslocamento amostrado em um osciloscópio digital. Os coeficientes angular e linear fornecerão os valores experimentais do momento de inércia do braço da balança de empuxo (J_b) e da constante elástica de torção do conjunto (κ).

A Tabela 3.2 mostra os valores das massas dos pesos-padrão disponíveis para os testes para obtenção da curva do momento de inércia do braço da balança de empuxo e suas incertezas de acordo com a calibração feita pelo fabricante *Mettler Toledo*.

Tabela 3.2 - Pesos-padrão que serão utilizados para a curva experimental do momento de inércia do braço da balança de empuxo.

Peso-padrão	Massa (g)
50	50,00003 ± 0,00010
50.	50,00003 ± 0,00010
100	100,00005 ± 0,00015
100.	100,00004 ± 0,00015
100..	100,00006 ± 0,00015
100...	100,00007 ± 0,00015
500	500,000 ± 0,002
500.	500,000 ± 0,002
500..	500,000 ± 0,002
500...	499,998 ± 0,002

Fonte: Adaptado de *Mettler Toledo*.

Combinando-se os pesos-padrão da Tabela 3.2 adequadamente é possível obter valores de massa de 50 g, 100 g, 150 g, 200 g, 250 g, 500 g e 1000 g (aproximadamente), tanto para simular a massa do *PPT* de um lado do braço da balança, quanto a do seu contrapeso equivalente, do outro lado do braço.

O momento de inércia do conjunto formado pelo braço da balança, os quatro eletrodos e os dois suportes, J'_b , a constante elástica de torção, κ , e suas respectivas incertezas, $\delta J'_b$ e $\delta \kappa$ serão obtidas conforme descrito em Taylor (1997) e mostrado a seguir.

A equação de uma reta, onde a é o coeficiente angular e b é o coeficiente linear, é dada por:

$$y = ax + b \tag{3.11}$$

Para diferentes valores medidos de y_i e suas respectivas incertezas, δy_i , define-se $w_i = 1/(\delta y_i)^2$.

Os coeficientes angular a e linear b serão dados por:

$$a = \frac{\sum w \sum wxy - \sum wx \sum wy}{\Delta} \quad (3.12)$$

$$b = \frac{\sum wx^2 \sum wy - \sum wx \sum wxy}{\Delta} \quad (3.13)$$

Definindo-se a variável Δ como sendo:

$$\Delta = \sum w \sum wx^2 - (\sum wx)^2 \quad (3.14)$$

A incerteza do coeficiente angular, δa , será:

$$\delta a = \sqrt{\frac{\sum w}{\Delta}} \quad (3.15)$$

E a incerteza do coeficiente linear, δb , será:

$$\delta b = \sqrt{\frac{\sum wx^2}{\Delta}} \quad (3.16)$$

3.2 Frequência natural da balança de empuxo

A aplicação de um impulso no braço da balança de empuxo faz com que ela oscile com uma frequência natural (f_{nat}) que irá depender das dimensões do braço da balança, da sua massa, da posição do propulsor em teste e do seu contrapeso. Além disso, os fios elétricos utilizados na alimentação dos dispositivos presos à balança (*PPT*, *DCE*) também influenciam o valor da sua frequência natural de oscilação (*CIARALLI et al., 2013*).

A frequência natural de oscilação do braço da balança de empuxo será obtida pela Transformada de *Fourier* do sinal de saída do sensor de deslocamento óptico amostrado em um osciloscópio digital (como o modelo TDS5034B da *TEKTRONIX (TEKTRONIX INC., 2005)*) e a incerteza da medição, δf_{nat} , pelo algoritmo da *FFT* (do inglês *Fast Fourier Transform*) (*OPPENHEIM et al., 1999*) através da equação a seguir:

$$\delta f_{nat} = \frac{f_a}{2^n + 2} \quad (3.17)$$

Na Equação 3.17 f_a é a frequência de amostragem do osciloscópio digital utilizado (TEKTRONIX INC., 2005) e n é um número inteiro que faz com que 2^n forneça um valor de amostragem maior e mais próximo ao número de amostras realizadas pelo osciloscópio. Por exemplo, para o osciloscópio modelo TDS5034B da *TEKTRONIX*, a taxa de amostragem é de 5 GHz e portanto, $f_a = 5$ GHz. Uma amostragem de 1 minuto fornecerá $5 \times 10^9 \cdot 60 = 3 \times 10^{11}$ amostras. Portanto, n deverá ser o suficiente para que 2^n seja maior e mais próximo de 3×10^{11} , ou seja, $n = 39$, pois $2^n = 2^{39} \approx 5,5 \times 10^{11}$ amostras. Substituindo-se os valores de f_a e n na Equação 3.17, obtém-se:

$$\delta f_{nat} = \frac{5 \times 10^9}{2^{39} + 2} \rightarrow \delta f_{nat} \approx 9,09 \times 10^{-3} \quad (3.18)$$

Portanto, o valor da incerteza para o exemplo dado, δf_{nat} , será de $\approx 9,09$ mHz.

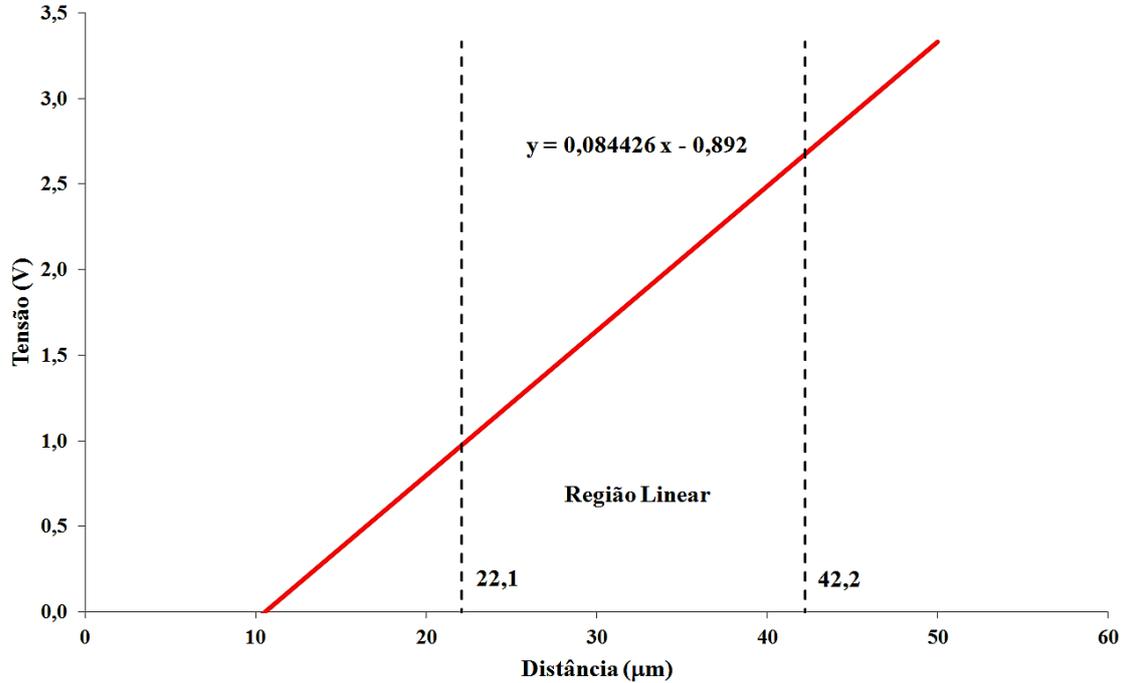
3.3 Deslocamento linear do braço da balança de empuxo

O deslocamento linear do braço da balança, Δx , é medido pelo sensor óptico, que através da sua curva de calibração fornece a distância do braço em relação ao sensor. Δx será obtido pela diferença entre a distância inicial do braço (balança em repouso) e a distância máxima que o braço terá após a aplicação do impulso.

A Figura 3.2 mostra a curva de calibração do sensor óptico utilizado na medição do deslocamento da balança.

O sensor óptico possui um disco refletivo (referência) que é preso ao braço da balança de empuxo e o sensor deve ser aproximado desse disco até que se estabeleça a condição de paralelismo, na qual a tensão de saída do sensor seja inferior a 250 mV (PHILTEC INC., 2016). Afasta-se o sensor até que a tensão de saída seja máxima e faz-se os ajustes de ganho no sensor para que essa tensão máxima seja ~ 5 V. Após esses ajustes o sensor deve ser colocado no centro da sua região linear de operação, dada pelo gráfico da Figura 3.2, sendo posicionado à uma distância de $32,15 \mu\text{m}$, o que corresponde à um sinal de saída de $\sim 1,822$ V. A incerteza da medida do deslocamento linear, $\delta \Delta x$ pode ser obtida conforme descrito em Taylor (1997) e deverá considerar a incerteza do osciloscópio utilizado na medição do sinal do sensor óptico e a incerteza do sinal do sensor (sua curva de calibração).

Figura 3.2 - Curva de calibração para o sensor óptico de deslocamento modelo D63-B(Bv2)C1E3 número de série 2904 *Tip* 4130 da *Philtec Inc.*.



Faixa linear $\pm 1\%$ = 22,1 a 42,2 μm

Fonte: Adaptado de (PHILTEC INC., 2016).

3.4 Distâncias em relação ao eixo de rotação.

A distância do *PPT* até o eixo de rotação da balança, r_T , e também a distância do sensor óptico até ao eixo, r_{sens} devem ser as maiores possíveis para que se maximize o deslocamento linear Δx (permitindo que a balança meça seu menor valor de impulso), conforme visto nas Equações 3.2 e 3.5, respectivamente. Essas distâncias podem ser medidas com uma régua milimétrica adequada e suas incertezas obtidas pela combinação da incerteza do instrumento de medição (régua milimetrada) com a incerteza estatística (número de medições realizadas).

3.5 Resumo dos métodos utilizados para o cálculo do impulso.

Os métodos demonstrados anteriormente para obtenção dos cinco parâmetros da Equação 3.6 (J , f_{nat} , Δx , r_T e r_{sens}), que permitem o cálculo do impulso (I_{bit}), estão apresentados de forma resumida na Tabela 3.3, que mostra também as incertezas

de cada parâmetro medido e os equipamentos que podem ser utilizados.

Tabela 3.3 - Resumo dos métodos de obtenção dos parâmetros da equação 3.6 para o cálculo do impulso (I_{bit}), suas incertezas e instrumentos utilizados para realizar as medidas.

	Momento de inércia do conjunto (J)	Frequência natural (f_{nat})	Deslocamento linear (Δx)	Distâncias ao eixo de rotação (r_T) e (r_{sens})
Método	Coefficiente angular (J_b) da curva dada por: $2J_p\omega^2 = \underbrace{-J'_b\omega^2}_{ax} + \underbrace{\kappa}_b$	Transformada de Fourier do sinal amostrado.	Amplitude do sinal de saída do sensor de deslocamento.	Medição direta da distância no braço da balança.
Unidade	kg.m ²	Hz	μm	m
Incerteza	δJ	δf_{nat}	$\delta \Delta x$	δr_T e δr_{sens}
Equipamentos Utilizados	Osciloscópio digital, sensor, pesos-padrão e paquímetro digital.	Osciloscópio digital e sensor.	Osciloscópio digital, sensor e sua curva de calibração.	Régua milimetrada.

Fonte: Produção do autor.

O impulso medido pela balança de empuxo é uma medida indireta, e sua incerteza, δI_{bit} , segundo Taylor (1997), poderá ser calculada pela Equação 3.19, dada por:

$$\frac{\delta I_{bit}}{I_{bit}} = \sqrt{\left(\frac{\delta J}{J}\right)^2 + \left(\frac{\delta f_{nat}}{f_{nat}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta x}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta r_T}{r_T}\right)^2 + \left(\frac{\delta r_{sens}}{r_{sens}}\right)^2} \quad (3.19)$$

4 EXPERIMENTOS

Os experimentos realizados com o DCE e com a balança de empuxo serão descritos neste capítulo. Os resultados obtidos serão apresentados com suas incertezas de acordo com Taylor (1997), Oppenheim et al. (1999), o Vocabulário Internacional de Metrologia (2012) e o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) (2008).

A incerteza da medição de uma escala contínua (e.g. graduação de uma régua milimetrada ou osciloscópio analógico) pode ser determinada pela metade da menor divisão da escala (TAYLOR, 1997).

Para o osciloscópio digital (como o modelo TDS5034B da *TEKTRONIX* (TEKTRO-NIX INC., 2005)), Figura 4.1, utilizado neste trabalho, adotou-se como incerteza da medida de tensão elétrica (diferença de potencial elétrico) a metade da resolução do eixo vertical. Ela é obtida dividindo-se o maior valor da tensão (possível de ser medida pela escala selecionada) pelo número de *bits* da resolução vertical (PHILIP, 2012). O modelo TDS5034B da *TEKTRONIX* possui 8 *bits* na escala vertical. A Tabela 4.1 mostra as incertezas das escalas/divisão para o osciloscópio digital modelo TDS5034B que serão utilizadas neste trabalho.

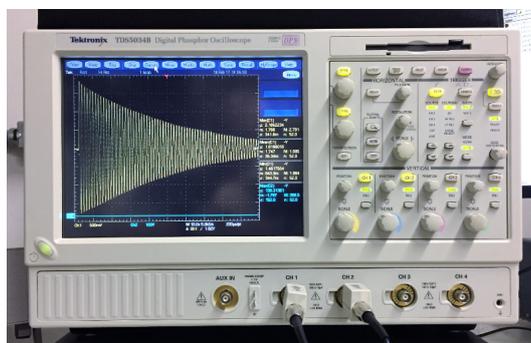
Tabela 4.1 - Escalas do osciloscópio digital modelo TDS5034B da *TEKTRONIX*, suas resoluções e incertezas.

Escala	Resolução	Incerteza
10 mV/divisão	10 mV/256 \approx 0,04 mV/div	\pm 0,02 mV
500 mV/divisão	500 mV/256 \approx 2 mV/div	\pm 1 mV
1 V/divisão	1 V/256 \approx 0,004 V/div	\pm 0,002 V
100 V/divisão	100 V/256 \approx 0,4 V/div	\pm 0,2 V

Fonte: Produção do autor.

As medições de tempo (escala horizontal do osciloscópio) foram realizadas com uma amostragem de 5000 pontos por segundo, ou seja, o intervalo de tempo entre um ponto e outro da aquisição do osciloscópio foi de 200 μ s (1/5000) que corresponde à uma resolução de 0,2 ms. A incerteza da medida será metade da resolução, ou seja, 0,1ms. Portanto, cada intervalo entre as leituras de tempo terá uma incerteza de \pm 0,1 ms e para os valores de variação de tempo, Δt , será a soma das duas incertezas, ou seja, $\delta\Delta t = 0,2$ ms.

Figura 4.1 - Osciloscópio digital modelo TDS5034B da *TEKTRONIX* (*TEKTRONIX INC.*, 2005) utilizado nos experimentos com a balança de empuxo.



Fonte: Produção do autor.

4.1 Curva de calibração do DCE

Os ensaios para a obtenção da curva de calibração experimental do DCE foram realizados utilizando-se os equipamentos e dispositivos listados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Equipamentos e dispositivos utilizados para a curva de calibração experimental do DCE.

Equipamento/ Dispositivo	Descrição
Balança analítica de precisão	Marca <i>Shimadzu</i> modelo AUY220 (<i>SHIMADZU ANALYTICAL AND MEASURING INSTRUMENTS</i> , 2008) (Figura 4.2).
Paquímetro digital	Marca <i>Mitutoyo</i> modelo 500-144B (Figura 4.3).
Eletrodo menor do DCE	Disco de alumínio com diâmetro de $31,70 \pm 0,04$ mm (Figura 4.4).
Eletrodo maior do DCE	Disco de alumínio com diâmetro de $50,89 \pm 0,04$ mm (Figura 4.4).
Anel de guarda do eletrodo menor	Anel de alumínio com diâmetro interno de $32,76 \pm 0,04$ mm e externo de $50,89 \pm 0,04$ mm (Figura 4.5).
Base de PTFE	Disco para fixação do eletrodo menor ao anel de guarda (Figura 4.5).
Fonte de tensão	Marca <i>Keithley Instruments, Inc.</i> modelo 6517A (<i>KEITHLEY INSTRUMENTS, INC.</i> , 2016) (Figura 4.6).
Base linear com micrômetro	Micrômetro marca <i>Mitutoyo</i> (Figura 4.16).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.2 mostra a balança analítica de precisão da marca *Shimadzu* modelo AUY220 (SHIMADZU ANALYTICAL AND MEASURING INSTRUMENTS, 2008) utilizada para a calibração do DCE. A força peso (do eletrodo maior) será dada pelo produto entre a massa e a aceleração gravitacional. A balança analítica utilizada possui uma sensibilidade de 0,1 mg (que possibilita a obtenção de uma força peso de $\approx 1 \mu\text{N}$).

Figura 4.2 - Balança analítica de precisão da marca *Shimadzu* modelo AUY220.



Fonte: Produção do autor.

Os eletrodos do DCE foram confeccionados em alumínio e apresentam diâmetros de $31,70 \pm 0,04$ mm (disco menor) e $50,89 \pm 0,04$ mm (disco maior). Esses valores foram medidos com o paquímetro digital marca *Mitutoyo* modelo 500-144B com resolução de 0,01 mm, mostrado na Figura 4.3.

Os furos na superfície dos eletrodos (Figura 4.4) são para sua fixação à estrutura da balança de empuxo e para sua conexão elétrica à fonte de tensão (eletrodo menor conectado ao terminal positivo da fonte e eletrodo maior ao terminal negativo).

Figura 4.3 - Paquímetro digital marca *Mitutoyo* modelo 500-144B com resolução de 0,01 mm.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.4 - Eletrodos de alumínio do DCE.



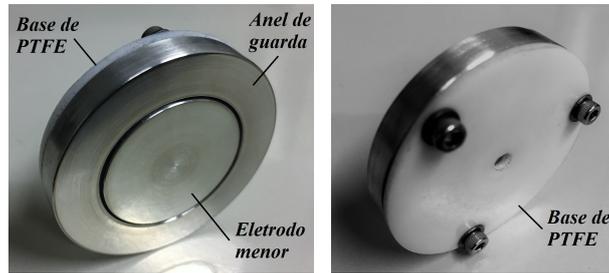
Vista frontal dos eletrodos do DCE (acima), vista posterior com os furos (abaixo).

Fonte: Produção do próprio autor.

O eletrodo menor possui um anel de guarda para minimizar os efeitos de borda do campo elétrico. A fixação entre o eletrodo e o anel de guarda é feita por um disco de PTFE que serve também para isolar eletricamente o eletrodo do anel. A Figura 4.5 mostra o eletrodo com o anel de guarda fixados através do disco de PTFE.

A fonte de tensão marca *Keithley Instruments, Inc.* modelo 6517A com tensão máxima de saída de 1000 VDC (KEITHLEY INSTRUMENTS, INC., 2016), vista na Figura 4.6, forneceu energia elétrica aos eletrodos do DCE.

Figura 4.5 - Eletrodo menor do DCE com seu anel de guarda.



Vista frontal do eletrodo menor do DCE montado na base de PTFE com seu anel de guarda (esquerda), vista posterior (direita).

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 4.6 - Fonte de tensão marca *Keithley Instruments, Inc.* modelo 6517A com tensão máxima de saída de 1000 VDC.

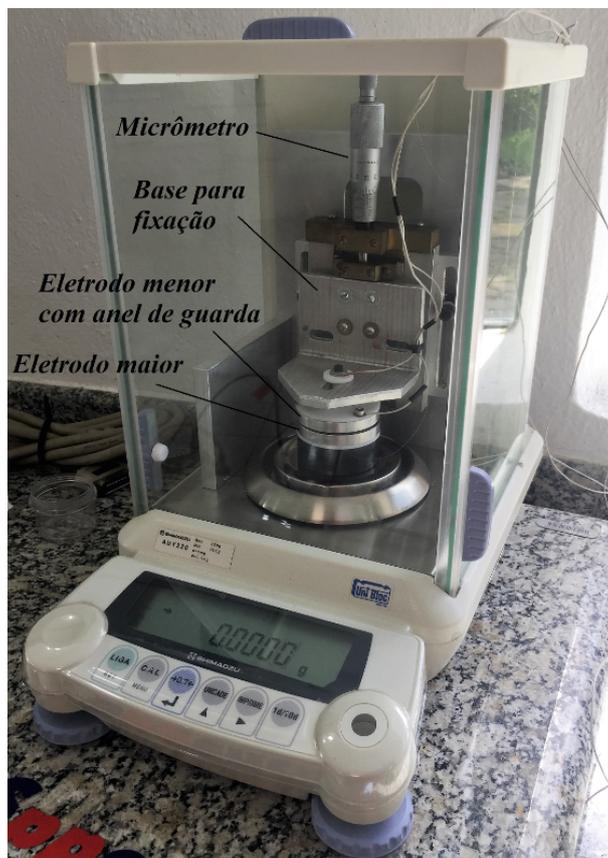


Fonte: Produção do próprio autor

Durante os ensaios para determinação da curva de calibração do DCE, os eletrodos foram dispostos de forma que o maior ficasse sobre o prato da balança analítica de precisão e o eletrodo menor, com seu anel de guarda e o disco de PTFE, fixados em uma base de alumínio com um micrômetro que permitia o ajuste da distância entre as faces dos eletrodos (D_E). A Figura 4.7 ilustra essa estrutura pronta para a calibração com a base e o micrômetro posicionados na balança de precisão antes da realização dos ensaios.

O processo de medição da distância entre os eletrodos, D_E , antes do ensaio da curva de calibração do DCE, foi realizado aproximando-se o eletrodo menor (com anel de

Figura 4.7 - Montagem dos eletrodos do DCE na balança analítica de precisão.



Fonte: Produção do próprio autor.

guarda) paralelamente ao eletrodo maior (no prato da balança analítica de precisão) através do micrômetro, após a balança ter sido tarada (Figura 4.7). A aproximação foi feita até que a balança começasse a marcar 0,0010 g (10 mg, seu valor de aferição), ou seja, o contato entre os eletrodos havia ocorrido. Nesse momento, fez-se uma leitura do valor do micrômetro e deslocou-se o eletrodo menor de forma que a nova leitura do micrômetro fosse a inicial acrescida da distância que se desejasse entre os eletrodos. Para a calibração do DCE escolheu-se a distância de 1 mm. Assim, com $D_E = 1$ mm conectou-se o terminal positivo da fonte de tensão da Figura 4.6 ao eletrodo menor e o terminal negativo ao eletrodo maior e também ao anel de guarda. manualmente, variou-se a tensão entre 0 e 1000 V, anotando-se o valor da equivalência em massa indicado pela balança analítica. Após a primeira calibração (com $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm), a fim de simular o efeito da redução da distância entre os eletrodos que seria observado quando o sistema operasse na balança, reduziu-se

a distância em $10 \mu\text{m}$ ($D_E = 0,99 \pm 0,01 \text{ mm}$). Para que os valores da curva de calibração do DCE fossem mais precisos (através de um tratamento estatístico) foram realizados cinco calibrações para cada valor de D_E . O valor médio da massa, obtido para cada nível de tensão escolhido, seu desvio padrão e sua incerteza estão listados na Tabela 4.3. A média, o desvio padrão e a incerteza de cada medida da massa foram obtidos pelas Equações 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente (TAYLOR, 1997). A média aritmética de N medições de uma variável x , sendo x_i o valor de cada medida, é dada por:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.1)$$

O desvio padrão para as N medições da variável x é:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

A incerteza da medição da variável x será:

$$\delta x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (4.3)$$

O tipo de incerteza das medidas das massas obtidas pela Equação 4.3 é chamado de **incerteza padrão do tipo A** (VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA, 2012) ou **desvio padrão da média** (TAYLOR, 1997) e representa uma avaliação estatística da medição. As incertezas expressas na Tabela 4.3 são uma combinação da **incerteza do tipo A** (estatística) e da **incerteza do tipo B** (proveniente do manual do instrumento fornecido pelo fabricante, da sua curva de calibração, dentre outros aspectos, caracterizando-se uma análise não estatística (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO), 2008)). Multiplicando-se os valores das massas listados na Tabela 4.3 pela aceleração da gravidade no local onde os experimentos foram realizados, $g = 9,7859395 \text{ m/s}^2$ (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2007), obteve-se os valores da força exercida pelos eletrodos do DCE em função da tensão aplicada entre eles mostrados na Tabela 4.4.

Com os dados da Tabela 4.4 obteve-se o gráfico da Figura 4.8, que mostra as cur-

Tabela 4.3 - Medidas realizadas para obtenção das curvas de calibração experimentais do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm no local do experimento.

$(D_E = 1,00 \pm 0,01 \text{ mm})$				$(D_E = 0,99 \pm 0,01 \text{ mm})$		
Tensão (V)	Massa média (g)	Desvio padrão (g)	Incerteza (g)	Massa média (g)	Desvio padrão (g)	Incerteza (g)
0	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001
50	0,0007	0,0000	0,0001	0,0007	0,0000	0,0001
100	0,0028	0,0000	0,0001	0,0028	0,0000	0,0001
150	0,0063	0,0000	0,0001	0,0064	0,0000	0,0001
200	0,0111	0,0000	0,0001	0,0113	0,0000	0,0001
250	0,0173	0,0001	0,0002	0,0177	0,0001	0,0002
300	0,0250	0,0001	0,0002	0,0255	0,0001	0,0002
350	0,0341	0,0001	0,0002	0,0348	0,0001	0,0002
400	0,0445	0,0002	0,0002	0,0454	0,0001	0,0002
450	0,0562	0,0002	0,0002	0,0574	0,0003	0,0002
500	0,0694	0,0003	0,0002	0,0709	0,0003	0,0002
550	0,0840	0,0003	0,0002	0,0858	0,0003	0,0002
600	0,1000	0,0004	0,0003	0,1021	0,0005	0,0003
650	0,1174	0,0004	0,0003	0,1199	0,0005	0,0003
700	0,1361	0,0006	0,0004	0,1390	0,0006	0,0003
750	0,1561	0,0006	0,0004	0,1596	0,0006	0,0004
800	0,1777	0,0007	0,0004	0,1816	0,0007	0,0004
850	0,2006	0,0007	0,0004	0,2049	0,0009	0,0005
900	0,2249	0,0008	0,0004	0,2297	0,0009	0,0005
950	0,2505	0,0010	0,0005	0,2560	0,0010	0,0006
1000	0,2776	0,0010	0,0006	0,2836	0,0012	0,0006

Fonte: Produção do autor.

vas de calibração experimental do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm. As incertezas de cada ponto medido, mostradas na Tabela 4.4, não foram representadas nos gráficos da Figura 4.8 por não serem visíveis. Os valores das equações das curvas contínua e tracejada foram obtidas por regressão polinomial de ordem 2 com o uso do *software Microsoft[®] Excel* com $R^2 = 1$.

Linearizando-se as curvas experimentais da Figura 4.8 (representando-se no eixo das abscissas o quadrado da tensão) é possível calcular os coeficientes da equação que será obtida por regressão linear e suas respectivas incertezas, utilizando-se as Equações 3.12, para o coeficiente angular, a Equação 3.13, para o coeficiente linear, e as Equações 3.15 e 3.16 para suas respectivas incertezas, δa e δb . Para o gráfico da Figura 4.9, que mostra as curvas de calibração experimental do DCE linearizadas, para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm, o coeficiente linear (b) foi

Tabela 4.4 - Medidas da força exercida pelos eletrodos em função da tensão aplicada entre eles (pontos da curva de calibração experimental do DCE) para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.

	$(D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm)	$(D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm)
Tensão (V)	Força (μN)	Força (μN)
0	0 \pm 1	0 \pm 1
50	7 \pm 1	7 \pm 1
100	27 \pm 1	27 \pm 1
150	62 \pm 1	63 \pm 1
200	109 \pm 1	110 \pm 1
250	169 \pm 1	173 \pm 2
300	245 \pm 1	249 \pm 2
350	334 \pm 2	340 \pm 2
400	435 \pm 2	444 \pm 2
450	550 \pm 2	562 \pm 2
500	679 \pm 2	694 \pm 2
550	822 \pm 2	840 \pm 2
600	979 \pm 3	1000 \pm 3
650	1149 \pm 3	1173 \pm 3
700	1332 \pm 4	1361 \pm 3
750	1528 \pm 4	1562 \pm 4
800	1739 \pm 4	1777 \pm 4
850	1963 \pm 4	2006 \pm 5
900	2201 \pm 4	2248 \pm 5
950	2452 \pm 5	2505 \pm 5
1000	2716 \pm 5	2775 \pm 6

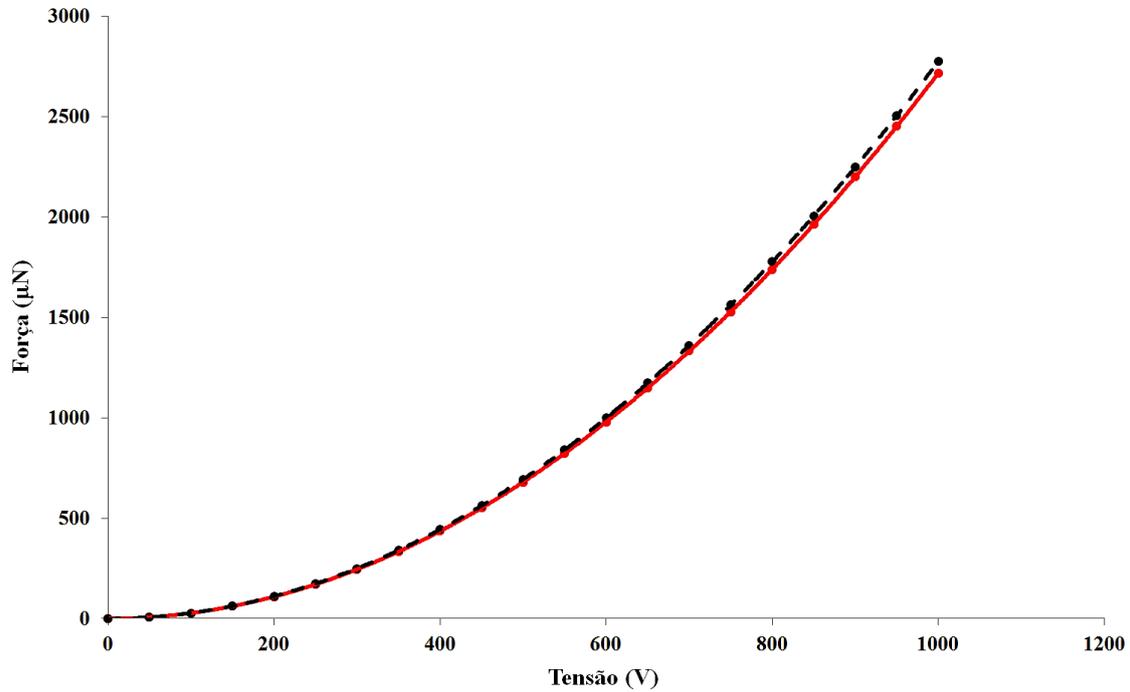
Fonte: Produção do autor.

considerado nulo. As incertezas de cada ponto medido não foram representadas por não serem visíveis.

As incertezas dos novos valores da força (δF), obtidas pelas curvas linearizadas da Figura 4.9, foram determinadas considerando-se as incertezas do coeficiente angular ($\delta a = 0,0021 \times 10^{-3} \mu\text{N}/\text{V}^2$) e do potencial elétrico da fonte de tensão ($\delta U = 2,5$ mV (KEITHLEY INSTRUMENTS, INC., 2016)). A Equação 4.4 mostra a incerteza da força devido à linearização das curvas de calibração experimental do DCE.

$$\delta F = \left[(U^2 + \delta U^2)(a + \delta a) - (U^2 - \delta U^2)(a - \delta a) \right] / 2 = U^2 \delta a + a \delta U^2 \quad (4.4)$$

Figura 4.8 - Curvas de calibração experimental do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.



Equação da curva (—) ($D_E = 1,00$ mm): $F_E = 2,700 \times 10^{-3}(U)^2 + 2,700 \times 10^{-3}(U) - 1,492 \times 10^{-1}$, e equação da curva (- - -) ($D_E = 0,99$ mm): $F_E = 2,800 \times 10^{-3}(U)^2 + 2,000 \times 10^{-3}(U) - 3,966 \times 10^{-1}$.

Fonte: Produção do autor.

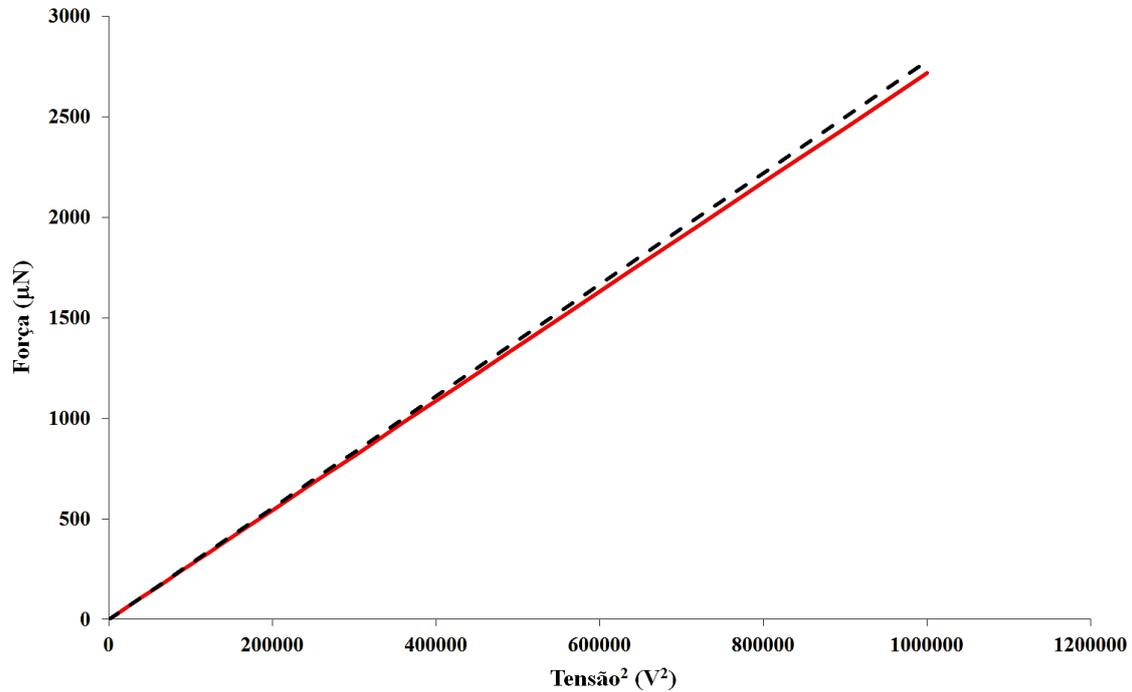
A incerteza δU^2 é calculada pela Equação 4.5 (TAYLOR, 1997):

$$\frac{\delta U^2}{U^2} = 2 \left| \frac{\delta U}{U} \right| \quad (4.5)$$

As curvas teóricas da calibração do DCE, obtidas com a Equação 2.7 e mostradas na Figura 4.10, possuem dois coeficientes (D_E e A_E) que tiveram suas incertezas (δD_E e δA_E) combinadas e calculadas pela Equação 4.6 (TAYLOR, 1997), mostrada a seguir:

$$\frac{\delta F_E}{|F_E|} = \sqrt{\left(\frac{\delta D_E}{D_E}\right)^2 + \left(\frac{\delta A_E}{A_E}\right)^2} \quad (4.6)$$

Figura 4.9 - Curvas de calibração experimental do DCE linearizadas, para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.



Coefficiente angular da curva (—) ($D_E = 1,00$ mm): $(2,7171 \pm 0,0021) \times 10^{-3}$ ($\mu\text{N}/\text{V}^2$);
 coeficiente angular da curva (- - -) ($D_E = 0,99$ mm): $(2,7763 \pm 0,0022) \times 10^{-3}$ ($\mu\text{N}/\text{V}^2$).

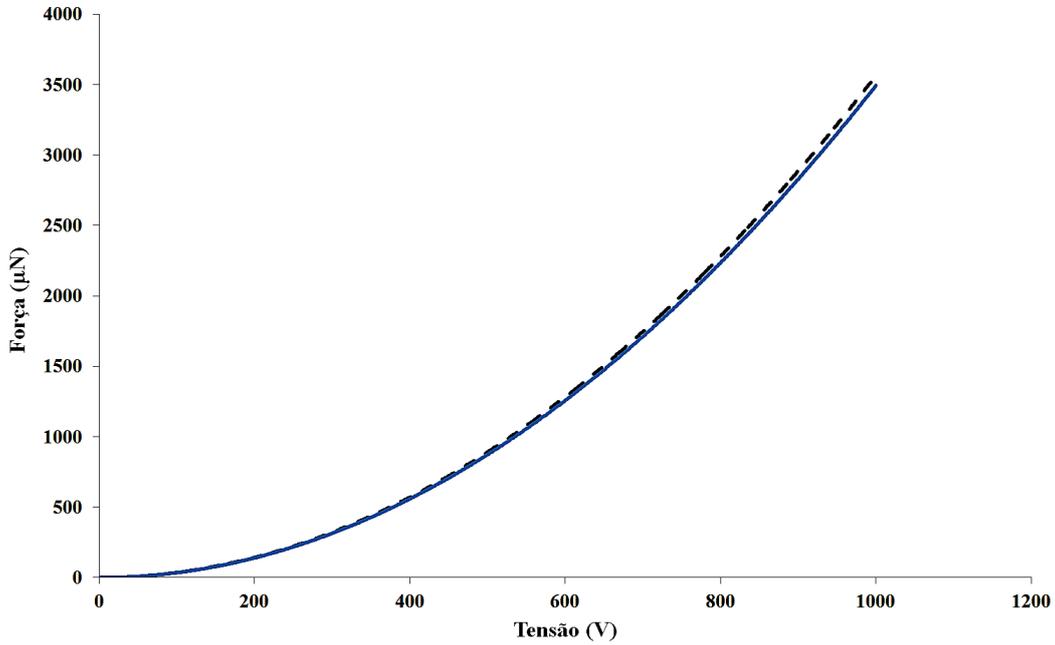
Fonte: Produção do autor.

Na Equação 4.6, δF_E , δD_E e δA_E representam as incertezas da força eletrostática, da distância entre os eletrodos e da área do eletrodo menor do DCE, respectivamente.

As incertezas percentuais ($(\delta F_E/F_E) \times 100$) das forças teóricas (devido às incertezas da medida da área do eletrodo menor, δA_E , e da distância D_E) para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm foram de 1,03% e 1,04%, respectivamente e não estão representadas nos gráficos da Figura 4.10 por serem muito pequenas.

A Tabela 4.5 apresenta os valores dos coeficientes utilizados na Equação 2.7 para a construção do gráfico das curvas de calibração teóricas do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm, mostradas na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Curvas teóricas da calibração do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.



Equação da curva (—) ($D_E = 1,00$ mm): $F_E = 3,495 \times 10^{-3}(U)^2$ e equação da curva (- -) ($D_E = 0,99$ mm): $F_E = 3,566 \times 10^{-3}(U)^2$.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.5 - Valores dos coeficientes utilizados na Equação 2.7 para a curva de calibração teórica do DCE da Figura 4.10.

Coeficiente	Descrição	Valor
ϵ_0	Constante de Permissividade ou Constante Dielétrica no Vácuo ¹ .	$8,8541878176... \times 10^{-12}$ F/m
ϵ_r	Constante de Permissividade Relativa do Ar ² .	1,00059
U	Diferença de potencial (d.d.p.) entre os eletrodos.	0 a 1000 V
D_E	Distância entre os eletrodos.	$1,00 \pm 0,01$ mm e $0,99 \pm 0,01$ mm
A_E	Área do eletrodo menor.	$7,89 \times 10^{-4} \pm 0,02 \times 10^{-4}$ m ²

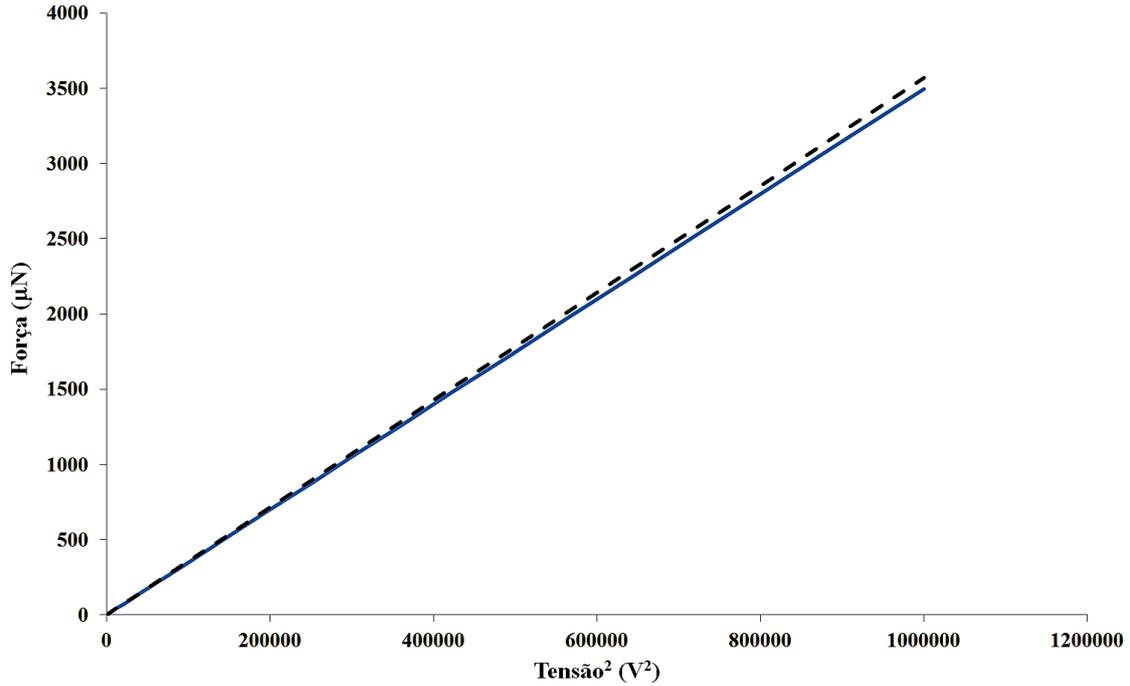
Fonte: Produção do autor.

¹Fonte: (SOCIEDADE PORTUGUESA DE QUÍMICA (SPQ), 1990)

²Fonte: (LABORATÓRIO DE MATERIAIS (LAMAT), 2015)

Fazendo-se a linearização das curvas (contínua e tracejada) da Figura 4.10, através da representação do quadrado da tensão no eixo das abscissas, obtém-se as curvas mostradas na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Curvas teóricas de calibração do DCE, linearizadas para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.



Coefficiente angular da curva contínua (—) ($D_E = 1,00$ mm): $(3,496 \pm 0,036) \times 10^{-3}$ ($\mu\text{N}/\text{V}^2$); coeficiente angular da curva tracejada (- - -) ($D_E = 0,99$ mm): $(3,567 \pm 0,037) \times 10^{-3}$ ($\mu\text{N}/\text{V}^2$).

Fonte: Produção do autor.

O aumento percentual da força eletrostática, $F_E(+)$, entre os eletrodos do DCE quando a distância entre eles, D_E , sofre uma redução de $10 \mu\text{m}$, ou seja, passa de $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm para $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm pode ser calculado pela Equação 2.8 e a incerteza do aumento pela Equação 4.7.

$$\frac{\delta F_E(+)}{|F_E(+)|} = \sqrt{\left(\frac{\delta F_{D_E(0,99)}}{F_{D_E(0,99)}}\right)^2 + \left(\frac{\delta F_{D_E(1,00)}}{F_{D_E(1,00)}}\right)^2} \quad (4.7)$$

Para as curvas experimentais linearizadas da Figura 4.9, o aumento percentual foi de $2,180 \pm 0,003 \%$. Para as curvas teóricas linearizadas da Figura 4.11, o aumento na força eletrostática foi de $2,03 \pm 0,03 \%$.

Os erros relativos percentuais das diferenças entre os valores das forças das curvas teóricas (gráficos da Figura 4.10) e das curvas experimentais (gráficos da Figura 4.8), ERP_F , foram calculados pela Equação 4.8 e a incerteza de cada erro, δERP_F , pela Equação 4.9.

$$ERP_F = \frac{|F_{(Teórica)} - F_{(Experimental)}|}{F_{(Teórica)}} \times 100 \quad (4.8)$$

$$\frac{\delta ERP_F}{|ERP_F|} = \sqrt{\left(\frac{\delta F_{(Teórica)}}{F_{(Teórica)}}\right)^2 + \left(\frac{\delta F_{(Experimental)}}{F_{(Experimental)}}\right)^2} \quad (4.9)$$

Os erros relativos percentuais entre os valores da força teóricos e experimentais para as curvas de calibração do DCE linearizadas (para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm) estão apresentados na Tabela 4.6.

As Figuras 4.12 e 4.13 comparam a calibração do DCE, teórica e experimental (não linearizadas), para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm, respectivamente.

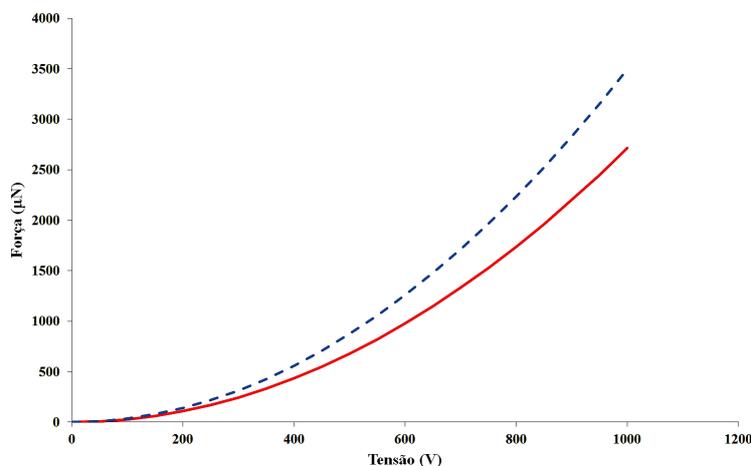
Nas Figuras 4.14 e 4.15 observa-se a comparação da calibração do DCE, teórica e experimental linearizadas, para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm, respectivamente.

Tabela 4.6 - Erro relativo percentual (ERP_F) entre a força teórica e experimental, para a calibração do DCE linearizadas (para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm).

Tensão ² (V ²)	$(D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm)			$(D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm)		
	$F_E(\mu\text{N})$ Teórica	$F_E(\mu\text{N})$ Experimental	ERP_F (%)	$F_E(\mu\text{N})$ Teórica	$F_E(\mu\text{N})$ Experimental	ERP_F (%)
0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	-	0,0 ± 0,0	0,00 ± 0,00	-
2500	8,7 ± 0,1	6,79 ± 0,1	22,29 ± 0,23	8,9 ± 0,1	6,94 ± 0,01	22,17 ± 0,23
10000	35,0 ± 0,4	27,17 ± 0,03	22,29 ± 0,23	35,7 ± 0,4	27,76 ± 0,04	22,17 ± 0,23
22500	78,7 ± 0,8	61,13 ± 0,07	22,29 ± 0,23	80,3 ± 0,8	62,47 ± 0,07	22,17 ± 0,23
40000	139,9 ± 1,4	108,68 ± 0,11	22,29 ± 0,23	142,7 ± 1,5	111,05 ± 0,12	22,17 ± 0,23
62500	218,5 ± 2,3	169,82 ± 0,17	22,29 ± 0,23	223,0 ± 2,3	173,52 ± 0,17	22,17 ± 0,23
90000	314,7 ± 3,2	244,54 ± 0,23	22,29 ± 0,23	321,1 ± 3,3	249,87 ± 0,24	22,17 ± 0,23
122500	428,3 ± 4,4	332,85 ± 0,31	22,29 ± 0,23	437,0 ± 4,5	340,10 ± 0,32	22,17 ± 0,23
160000	559,4 ± 5,8	434,74 ± 0,40	22,29 ± 0,23	570,8 ± 5,9	444,22 ± 0,41	22,17 ± 0,23
202500	708,0 ± 7,3	550,21 ± 0,49	22,29 ± 0,23	722,4 ± 7,5	562,21 ± 0,51	22,17 ± 0,23
250000	874,1 ± 9,0	679,28 ± 0,60	22,29 ± 0,23	891,8 ± 9,3	694,09 ± 0,62	22,17 ± 0,23
302500	1057,6 ± 10,9	821,92 ± 0,72	22,29 ± 0,23	1079,1 ± 11,2	839,84 ± 0,75	22,17 ± 0,23
360000	1258,7 ± 13,0	978,16 ± 0,85	22,29 ± 0,23	1284,2 ± 13,4	999,48 ± 0,88	22,17 ± 0,23
422500	1477,2 ± 15,2	1148,98 ± 0,99	22,29 ± 0,23	1507,2 ± 15,7	1173,01 ± 1,03	22,17 ± 0,23
490000	1713,2 ± 17,6	1331,38 ± 1,14	22,29 ± 0,23	1748,0 ± 18,2	1360,41 ± 1,19	22,17 ± 0,23
562500	1966,7 ± 20,3	1528,37 ± 1,30	22,29 ± 0,23	2006,6 ± 20,9	1561,69 ± 1,35	22,17 ± 0,23
640000	2237,6 ± 23,0	1738,95 ± 1,48	22,29 ± 0,23	2283,1 ± 23,7	1776,86 ± 1,53	22,17 ± 0,23
722500	2526,1 ± 26,0	1963,11 ± 1,66	22,29 ± 0,23	2577,4 ± 26,8	2005,91 ± 1,72	22,17 ± 0,23
810000	2832,0 ± 29,2	2200,85 ± 1,85	22,29 ± 0,23	2889,5 ± 30,0	2248,84 ± 1,92	22,17 ± 0,23
902500	3155,4 ± 32,5	2452,18 ± 2,06	22,29 ± 0,23	3219,5 ± 33,5	2505,65 ± 2,14	22,17 ± 0,23
1000000	3496,3 ± 36,0	2717,10 ± 2,27	22,29 ± 0,23	3567,3 ± 37,1	2776,34 ± 2,36	22,17 ± 0,23

Fonte: Produção do autor.

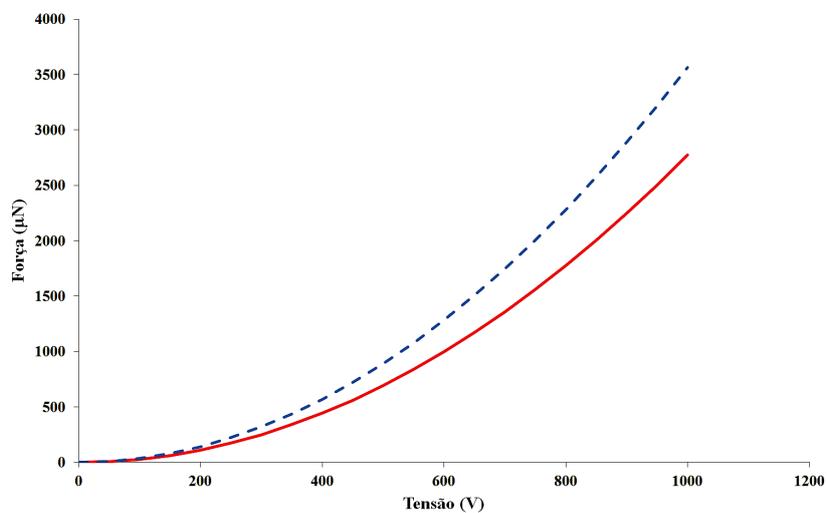
Figura 4.12 - Comparação entre a calibração do DCE teórica e experimental para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm.



Curva teórica (- - -), e curva experimental (—).

Fonte: Produção do próprio autor.

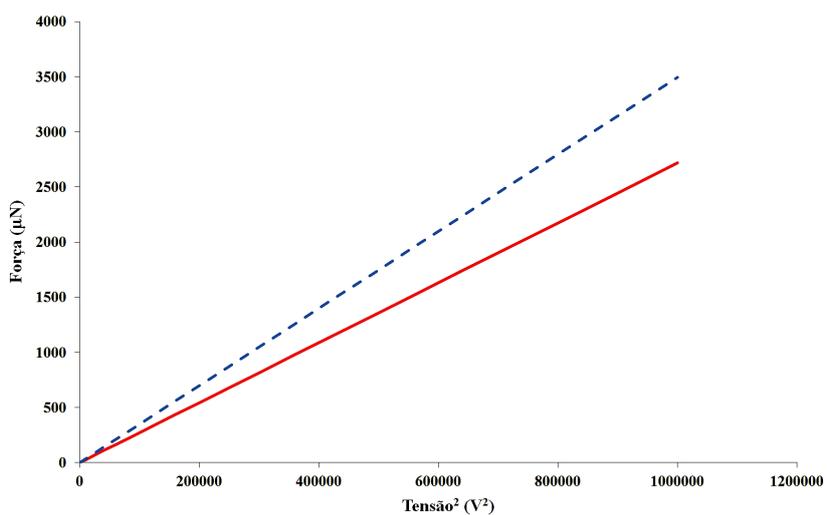
Figura 4.13 - Comparação entre a calibração do DCE teórica e experimental para $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.



Curva teórica (- - -), e curva experimental (—).

Fonte: Produção do próprio autor.

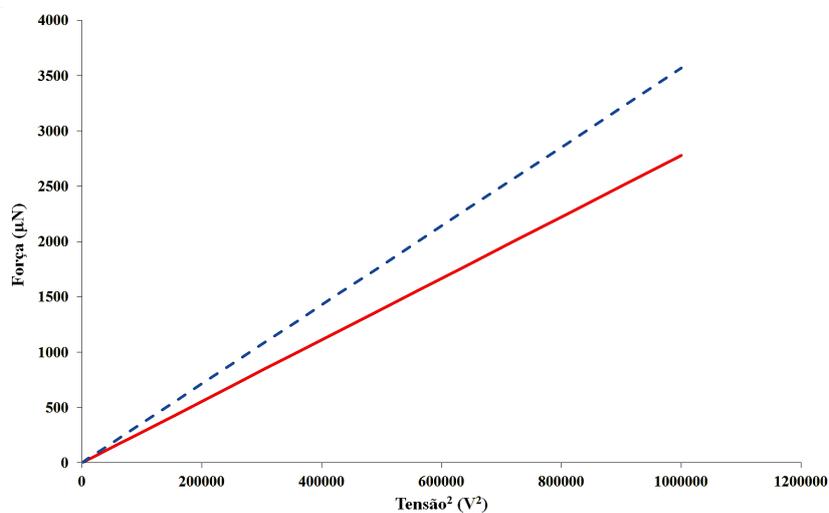
Figura 4.14 - Calibração teórica e experimental do DCE linearizadas, para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm.



Curva teórica (- - -), e curva experimental (—).

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 4.15 - Calibração teórica e experimental do DCE linearizadas, para $D_E = 0,99 \pm 0,01$ mm.



Curva teórica (- - -), e curva experimental (—).

Fonte: Produção do próprio autor.

O micrômetro utilizado nos experimentos (marca *Mitutoyo*), visto na Figura 4.16, possui resolução de $10 \mu\text{m}$ e permite uma leitura com incerteza de $\pm 5 \mu\text{m}$. Para o ajuste da distância D_E , que é obtida pela diferença entre duas posições lidas na escala do micrômetro, a incerteza será a soma da incerteza de cada leitura (TAYLOR, 1997), ou seja $\pm 10 \mu\text{m}$.

Figura 4.16 - Micrômetro marca *Mitutoyo* com resolução de $10 \mu\text{m}$.

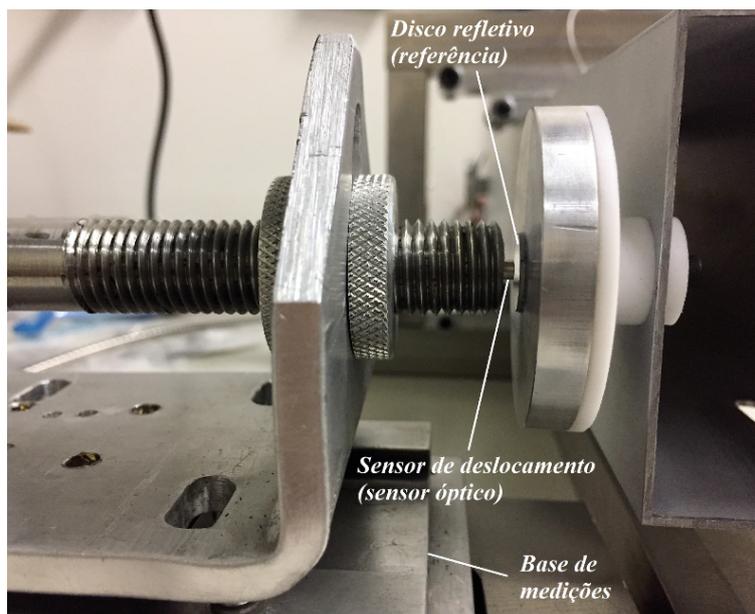


Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 Montagem e ajustes do sensor de deslocamento - sensor óptico

O sensor óptico foi montado na base de medições da balança de empuxo e seu disco refletivo foi fixado na lateral do braço da balança, conforme ilustra a Figura 4.17.

Figura 4.17 - Sensor óptico montado na base de medições da balança de empuxo e seu disco refletivo (referência) no braço da balança.

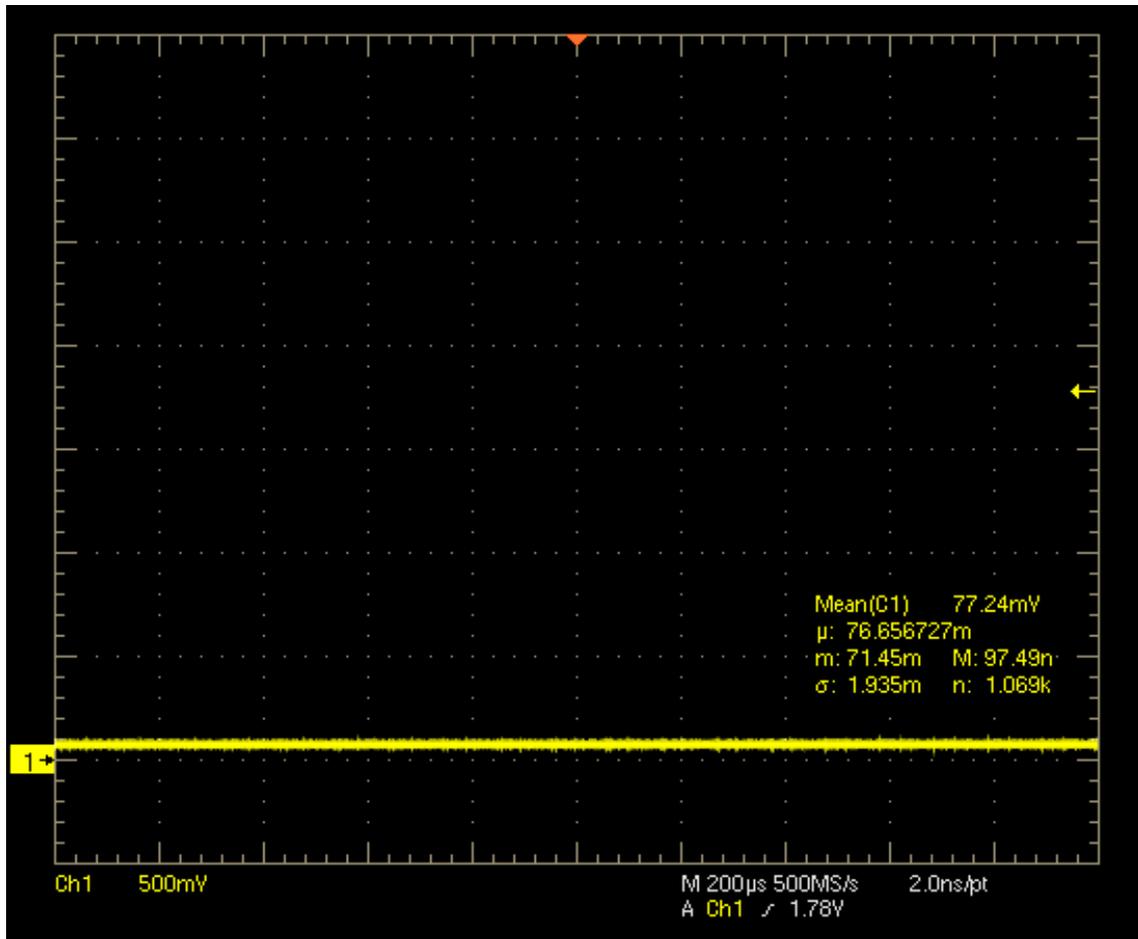


Fonte: Produção do autor.

Para que a curva de calibração fornecida pelo fabricante (PHILTEC INC., 2016), mostrada na Figura 2.7, seja utilizada deve-se garantir o paralelismo entre a face da extremidade do sensor e o alvo refletivo (disco preso ao braço da balança de empuxo). Segundo o fabricante (Philtec Inc.), essa condição é atingida quando a tensão de saída do sensor for menor que 250 mV (PHILTEC INC., 2016). Na Figura 4.18 observa-se a tensão de saída do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital) com um valor de $77,24 \pm 0,02$ mV, mostrando que a condição de paralelismo foi satisfeita.

É necessário também ajustar o ganho de tensão do sensor. Para isso, ele deve ser posicionado o mais distante possível do seu alvo, ficando no limite entre a “região próxima” e a “região distante”, ou seja, no ponto onde a tensão de saída é máxima. Nessa posição, regula-se o potenciômetro localizado no módulo eletrônico do sensor de forma que a tensão seja 5 V. Na Figura 4.19 observa-se o sinal da tensão de

Figura 4.18 - Sinal de tensão do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital) com a condição de paralelismo satisfeita.



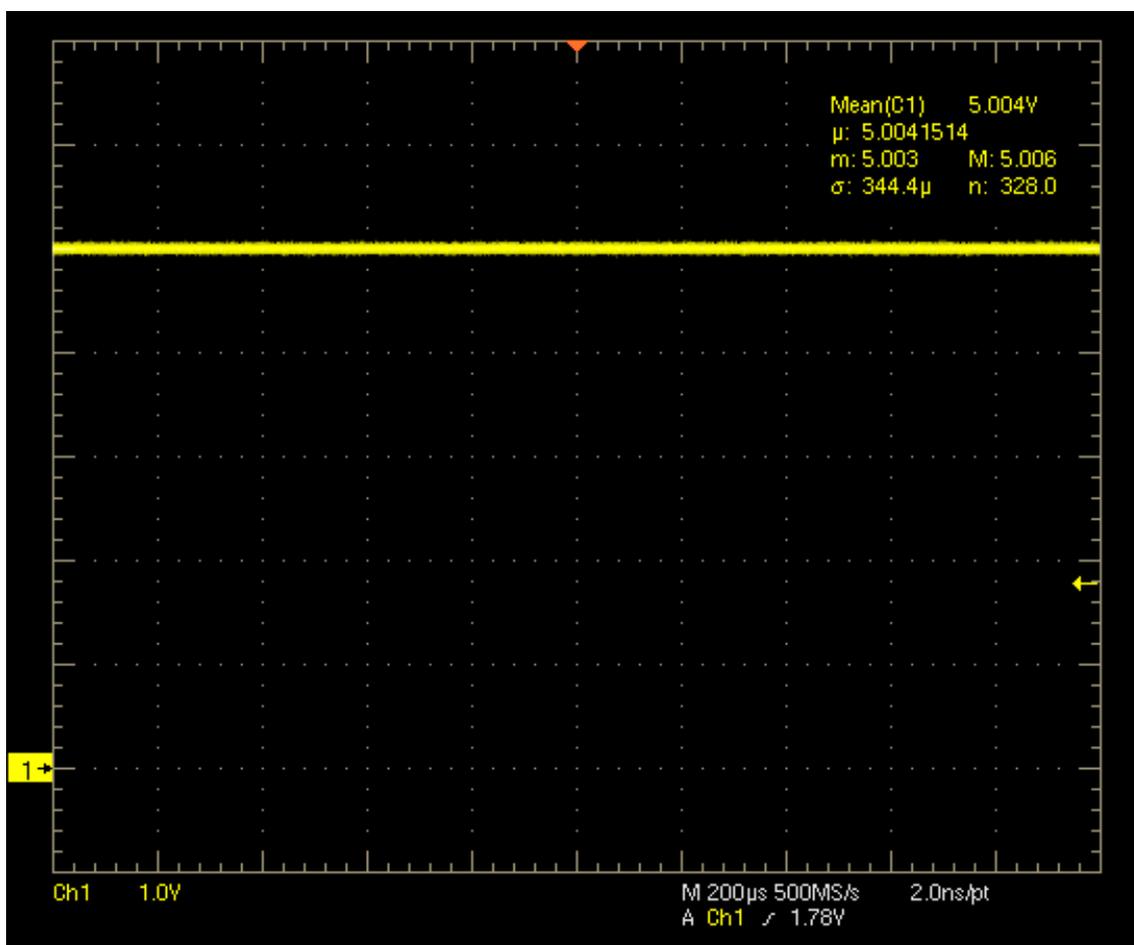
Fonte: Produção do autor.

$5,004 \pm 0,002$ V do sensor óptico, medido pelo osciloscópio digital, mostrando que o ajuste foi realizado.

Para um melhor aproveitamento da linearidade do sensor ele deve ser posicionado no centro da faixa que vai de 22,1 a 42,2 μm , e corresponde à sua região linear de operação. Na região linear, a curva de tensão (U) em função da distância entre o alvo e o sensor (r) é dada pela Equação 4.10 (em V por μm).

$$U = 8,4426 \times 10^{-2}(r) - 0,892 \quad (4.10)$$

Figura 4.19 - Sinal de saída máximo do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital).



Fonte: Produção do autor.

Portanto, para que o sensor esteja no centro da sua região linear de operação e possa medir a oscilação da balança de empuxo, sua distância em relação ao alvo deverá ser de $(22,1 + 42,2)/2 = 32,15 \mu\text{m}$. A Tabela 4.7 mostra os valores de tensão de saída do sensor óptico obtidas pelo Equação 4.10 para as distâncias limites da sua região de operação.

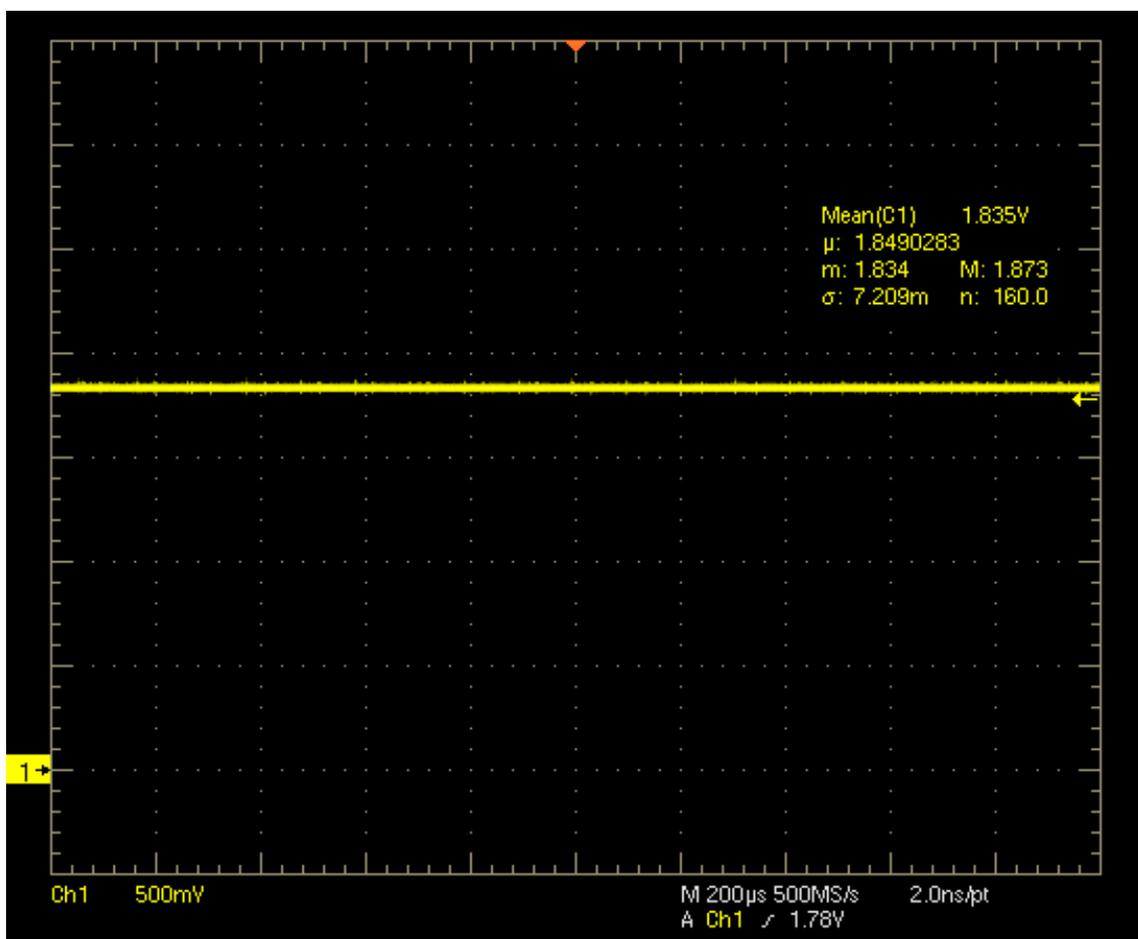
A Figura 4.20 mostra o sinal de saída do sensor óptico quando ele se encontra posicionado no centro da sua região linear de operação, ou seja, com uma tensão de $1,835 \pm 0,001 \text{ V}$.

Tabela 4.7 - Valores de tensão de saída do sensor óptico para seus limites de distância da região linear de operação obtidas pela Equação 4.10.

Limite	Distância (μm)	Tensão (V)
Superior	42,2	2,67
Médio	32,15	1,82
Inferior	22,1	0,93

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.20 - Sinal de tensão do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital) posicionado no centro da região linear de operação.

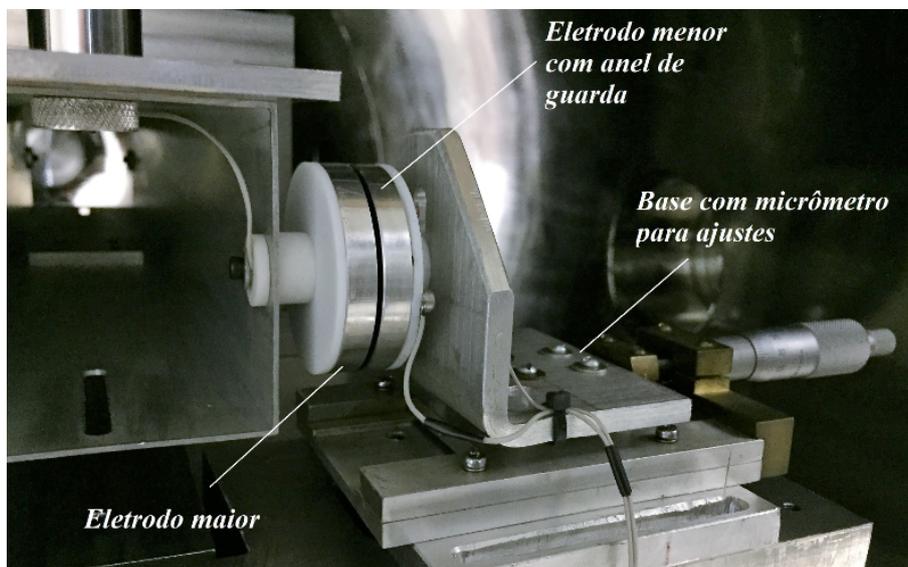


Fonte: Produção do autor.

4.3 Montagem e ajustes do DCE na balança de empuxo

O dispositivo de calibração eletrostática (DCE) foi montado na base de medições, ao lado do braço da balança de empuxo, conforme pode ser visto na Figura 4.21. O eletrodo maior foi fixado ao braço da balança e na base com micrômetro para ajustes, fixou-se o eletrodo menor com o anel de guarda.

Figura 4.21 - Dispositivo de calibração eletrostática montado na base de medições da balança de empuxo.



Fonte: Produção do autor.

Na balança analítica de precisão, utilizada para se obter a curva de calibração do DCE, o ajuste da distância entre os eletrodos (D_E) foi realizado aproximando-se o eletrodo menor, na base com micrômetro, até que houvesse o seu contato com o eletrodo maior, sobre o prato da balança. O contato foi sentido pela balança analítica através de uma variação de massa de 1 mg. A partir daí os eletrodos foram afastados por duas voltas completas do micrômetro, que corresponde ao valor de $1,00 \pm 0,01$ mm. Na balança de empuxo os eletrodos foram aproximados até que o sinal de saída do sensor óptico parasse de oscilar, devido ao contato entre os eletrodos. A partir daí, novamente os eletrodos eram afastados por duas voltas completas do micrômetro, correspondendo ao valor de $1,00 \pm 0,01$ mm. Com o terminal positivo da fonte de tensão digital conectado ao eletrodo menor e com o

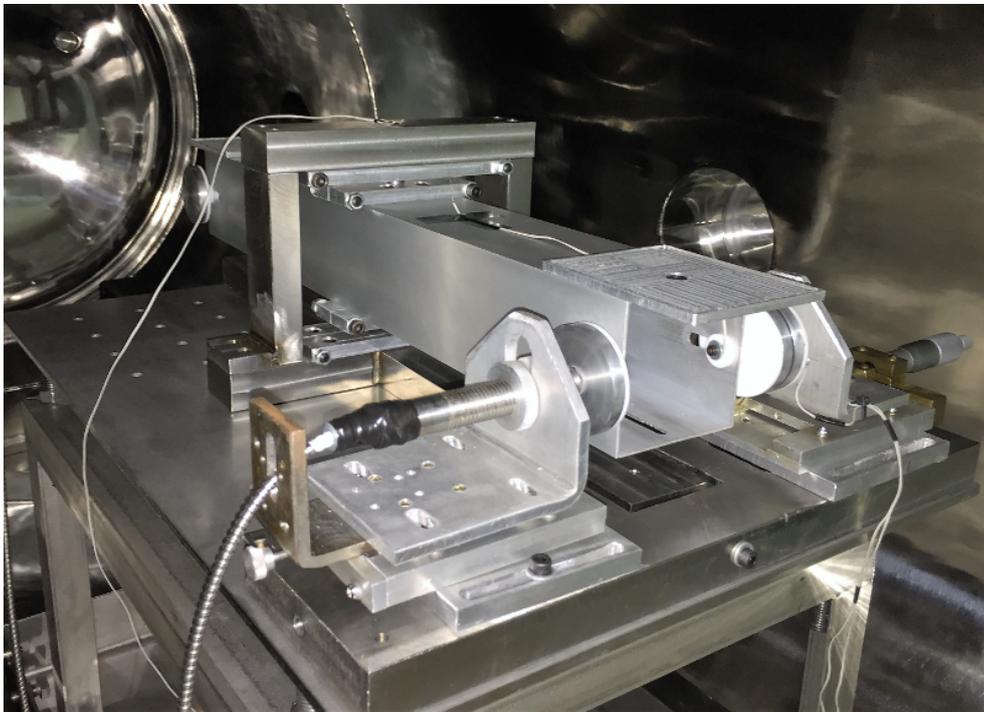
terminal negativo da fonte conectado ao eletrodo maior e ao anel de guarda, foram iniciados os testes com a balança de empuxo.

4.4 Testes com a balança de empuxo

Os testes realizados com a balança de empuxo foram o de medição do impulso e o de calibração estática. Além destes testes, realizou-se também alguns ensaios para se determinar o momento de inércia do braço da balança e o coeficiente de torção experimentais, que são utilizados para as medições do impulso.

A Figura 4.22 mostra a balança de empuxo pronta para testes no interior da câmara de vácuo. Nela pode-se notar os eletrodos nas laterais do braço da balança, utilizados para manter seu equilíbrio, além do DCE e do sensor óptico, montados sobre a base de medições. Sobre o braço estão os suportes que fazem o alinhamento do *PPT* (que não foi testado nesse trabalho) e suportam os pesos-padrão utilizados para simular as massas de *PPTs* (na faixa entre 100 a 1000 g) e permitir a caracterização da balança de empuxo.

Figura 4.22 - Balança de empuxo pronta para testes.



Fonte: Produção do autor.

Não estavam previstos testes da balança de empuxo dentro da câmara de vácuo (Figura 4.23) neste trabalho. Porém, devido à grande sensibilidade da balança de empuxo às vibrações nas vizinhanças do laboratório, decidiu-se colocar a balança dentro da câmara de vácuo, aumentando a inércia do sistema e isolando a balança de ruídos percebidos pelo ar.

Figura 4.23 - Câmara de vácuo.



Fonte: Produção do autor.

4.4.1 Ensaios para medição do momento de inércia e da constante elástica de torção da balança de empuxo

Esses ensaios são realizados para que se possa determinar experimentalmente o momento de inércia do braço da balança e a constante elástica de torção total, caracterizando-se assim, a balança de empuxo e permitindo a realização da medição do impulso (I_{bit}).

4.4.1.1 Determinação de J'_b e κ

Conforme descrito em 3.1 o momento de inércia do braço da balança será considerado como o momento de inércia do conjunto formado por: braço da balança de empuxo (J_b), os quatro eletrodos (J_e) e os dois suportes para os pesos-padrão (J_s). Portanto, o momento de inércia do braço da balança de empuxo será $J'_b = J_b + J_e + J_s$, e não apenas J_b .

A equação da reta que permitirá a obtenção dos coeficientes angular (J'_b) e linear (κ) será dada pela Equação 3.10. Os coeficientes angular, J'_b , e linear, κ , serão obtidos pelas Equações 3.12 e 3.13, respectivamente e as incertezas $\delta J'_b$ e $\delta \kappa$ serão calculadas pelas Equações 3.15 e 3.16, respectivamente sendo $\delta a = \delta J'_b$ e $\delta b = \delta \kappa$.

A Tabela 4.8 mostra os valores das massas combinadas dos pesos-padrão, listados na Tabela 3.2, utilizadas na determinação dos pontos para a obtenção do momento de inércia J'_b e da constante elástica de torção κ experimentais. De um lado do braço da balança de empuxo serão colocadas as massas equivalentes aos *PPTs* e do outro lado as massas correspondentes aos contrapesos (CP).

Tabela 4.8 - Pesos-padrão combinados para obtenção do momento de inércia (J'_b) e da constante elástica de torção (κ) experimentais.

Ponto	Peso-padrão	Massa (g)	
1	-	0	Massas dos <i>PPTs</i>
2	50	50,00003 ± 0,00010	
3	100	100,00005 ± 0,00015	
4	50 + 100	150,00008 ± 0,00025	
5	100 + 100.	200,00009 ± 0,00030	
6	50 + 100 + 100.	250,00012 ± 0,00040	
7	500	500,000 ± 0,002	
8	500 + 500.	1000,000 ± 0,004	
1	-	0	Massas dos CP
2	50.	50,00003 ± 0,00010	
3	100..	100,00006 ± 0,00015	
4	50. + 100..	150,00009 ± 0,00025	
5	100..+100...	200,00013 ± 0,00030	
6	50.+100..+100...	250,00016 ± 0,00040	
7	500..	500,000 ± 0,002	
8	500..+500...	999,998 ± 0,004	

Fonte: Adaptado de *Mettler Toledo*.

Para cada ponto (de 1 a 8) da Tabela 4.8 posicionou-se os pesos-padrão (sobre os

suportes) com o seu centro geométrico alinhado ao centro do eletrodo e mediu-se a distância entre este centro geométrico e o eixo de rotação do braço da balança (cerca de $0,2670 \pm 0,0005$). Isso permitiu a obtenção do momento de inércia (Equação 3.7) dos pesos-padrão ($J_P = J_{PPT} + J_{CP}$), que é dado pela soma do momento de inércia das massas dos *PPTs* simulados (J_{PPT}) com o momento de inércia das massas dos contrapesos (J_{CP}). Aplicou-se um impulso (força eletrostática do DCE) na balança de empuxo e mediu-se (com o osciloscópio digital) a frequência de oscilação (f_{nat}) do braço da balança (*FFT* do sinal de tensão do sensor óptico). A Tabela 4.9 apresenta os valores de J_P e de f_{nat} obtidos.

Tabela 4.9 - Valores de J_P e de f_{nat} obtidos para a determinação da curva linear $J_P(2\pi f_{nat})^2 = J'_b \cdot (2\pi f_{nat})^2 + \kappa$.

Ponto	J_P (kg·m ²)	f_{nat} (mHz)
1	0	$878,7 \pm 9,5$
2	$(7,1 \pm 0,1) \times 10^{-3}$	$816,8 \pm 9,5$
3	$(14,3 \pm 0,2) \times 10^{-3}$	$767,9 \pm 9,5$
4	$(21,4 \pm 0,3) \times 10^{-3}$	$725,8 \pm 9,5$
5	$(28,5 \pm 0,4) \times 10^{-3}$	$690,9 \pm 9,5$
6	$(35,6 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	$665,0 \pm 9,5$
7	$(71,3 \pm 1,0) \times 10^{-3}$	$550,7 \pm 9,5$
8	$(142,6 \pm 2,0) \times 10^{-3}$	$435,3 \pm 9,5$

Fonte: Produção do autor.

As incertezas dos valores dos momentos de inércia mostrados na Tabela 4.9 foram obtidas somando-se as incertezas δJ_{PPT} com δJ_{CP} ; δJ_{PPT} e δJ_{CP} foram obtidas pelas Equações 4.11 e 4.12, respectivamente. Elas combinam as incertezas das massas dos pesos-padrão (m_{PPT} e m_{CP} , listadas na Tabela 4.8) com o quadrado das distâncias entre os pesos-padrão e o eixo de rotação da balança de empuxo ($(r_{PPT})^2$ e $(r_{CP})^2$, sendo $r_{PPT} = r_{CP} = 0,267 \pm 0,01$ mm).

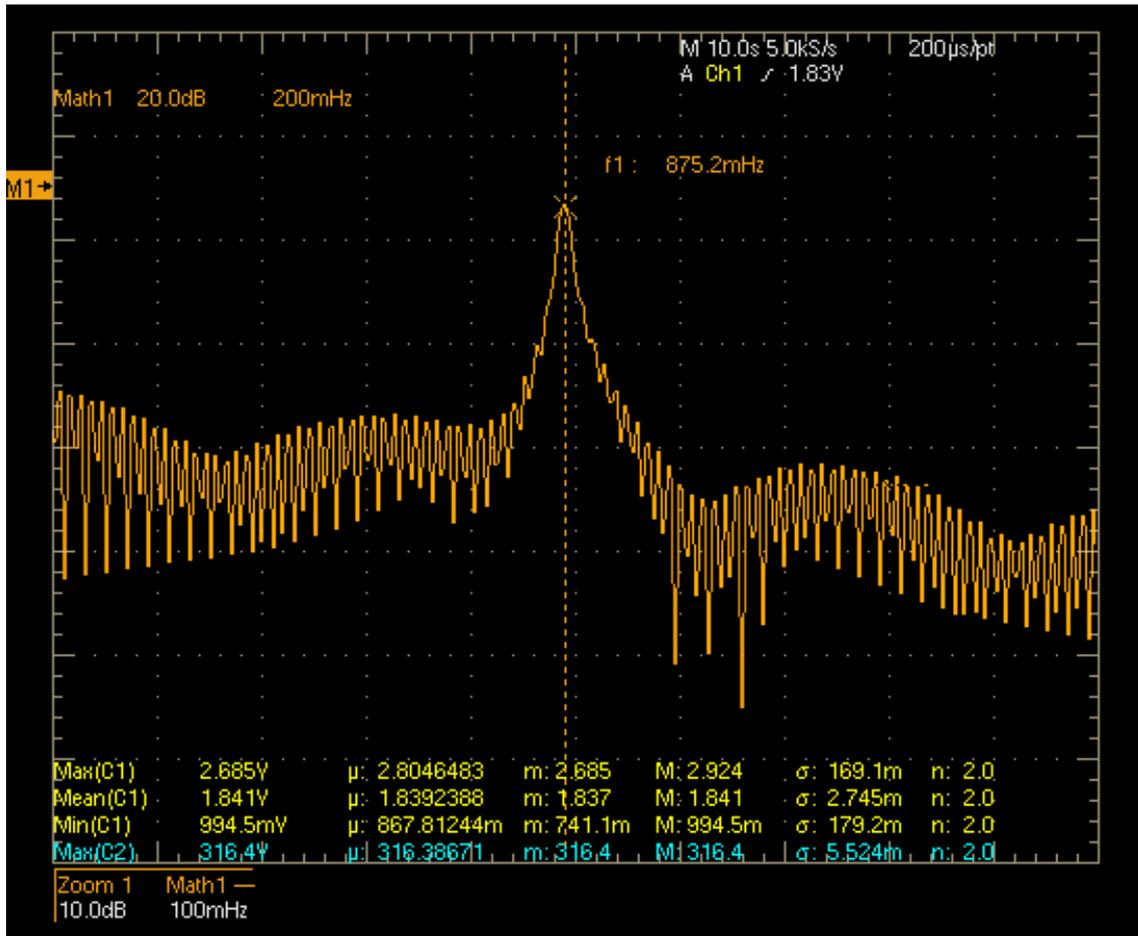
$$\frac{\delta J_{PPT}}{|J_{PPT}|} = \sqrt{\left(\frac{\delta m_{PPT}}{m_{PPT}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(r_{PPT})^2}{(r_{PPT})^2}\right)^2} \quad (4.11)$$

$$\frac{\delta J_{CP}}{|J_{CP}|} = \sqrt{\left(\frac{\delta m_{CP}}{m_{CP}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(r_{CP})^2}{(r_{CP})^2}\right)^2} \quad (4.12)$$

A Figura 4.24 mostra a *FFT* do sinal de tensão do sensor, realizada em um dos

ensaios, com o valor central indicando a frequência natural de oscilação da balança (f_{nat}), a fim de ilustrar o processo de obtenção deste parâmetro.

Figura 4.24 - *FFT* do sinal de tensão do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital) para J'_b .



Fonte: Produção do autor.

Utilizando-se os valores calculados do momento de inércia (J_P) e com os valores das frequências medidas (mostrados na Tabela 4.9), obteve-se os pontos da Tabela 4.10, conforme a Equação 4.13, mostrada a seguir:

$$\underbrace{J_P \omega^2}_y = \underbrace{-J'_b \omega^2}_{ax} + \underbrace{\kappa}_b \quad (4.13)$$

Tabela 4.10 - Pontos para se obter graficamente os valores do momento de inércia J'_b e da constante elástica de torção κ .

Ponto	$J_P \cdot \omega^2$ (kg· m ² · rad ² /s ²)	ω^2 (rad ² /s ²)
1	0	30,480 ± 0,662
2	0,188 ± 0,007	26,341 ± 0,615
3	0,332 ± 0,013	23,278 ± 0,578
4	0,445 ± 0,018	20,798 ± 0,547
5	0,537 ± 0,022	18,843 ± 0,520
6	0,622 ± 0,027	17,456 ± 0,501
7	0,854 ± 0,042	11,973 ± 0,415
8	1,066 ± 0,062	7,479 ± 0,328

Fonte: Produção do autor.

As incertezas $\delta(J_P \cdot \omega^2)$ e $\delta\omega^2$ foram obtidas pelas Equações 4.14 e 4.15, respectivamente:

$$\frac{\delta(J_P \cdot \omega^2)}{|(J_P \cdot \omega^2)|} = \frac{\delta J_P}{|J_P|} + \frac{\delta\omega^2}{\omega^2} \quad (4.14)$$

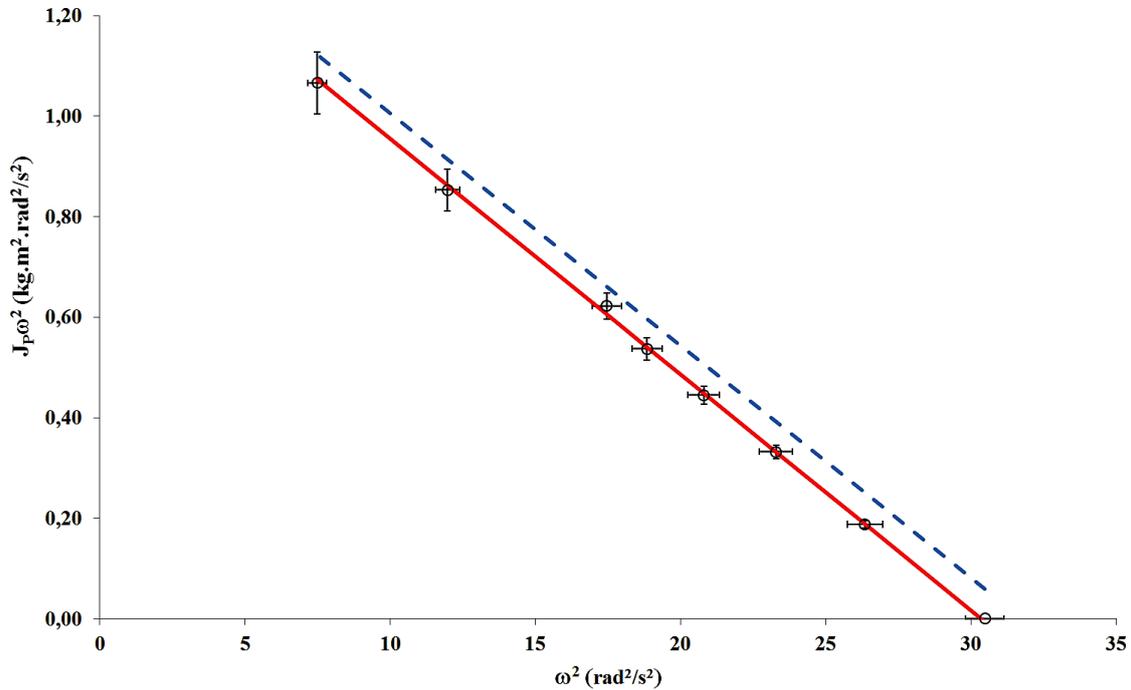
$$\frac{\delta\omega^2}{\omega^2} = |2| \frac{\delta\omega}{|\omega|} \quad (4.15)$$

A Tabela 4.10 mostra os valores de $J_P \cdot \omega^2$ (kg· m²· rad²/s²) com os respectivos valores de ω^2 (rad²/s²) e a Figura 4.25 mostra o gráfico com os valores desta tabela. Os coeficientes angular (J'_b) e linear (κ) foram obtidos pelas Equações 3.12 e 3.13, respectivamente. As Equações 3.15 e 3.16 fornecem as incertezas $\delta J'_b$ e $\delta\kappa$, respectivamente. As barras verticais do gráfico da Figura 4.25 representam as incertezas dos valores do eixo das ordenadas e as horizontais, a incertezas dos valores do eixo das abscissas.

A Tabela 4.11 compara os resultados de J'_b e κ , obtidos graficamente, com o valor teórico de J'_b , calculado com o auxílio do *software AutoDesk Inventor*[®] *Professional 2016* versão educacional, e com o valor teórico de κ , fornecido pelo fabricante *Riverhawk Company*, apresentando o erro relativo percentual entre eles.

O resultado experimental da constante elástica de torção da balança de empuxo (κ) foi menor do que o valor teórico (mostrados na Tabela 4.11). Mas considerando-se a incerteza do valor teórico de κ , fornecida pelo fabricante *Riverhawk Company*, que é de ± 10 %, o valor médio experimental de κ , que foi de 1,425 N·m/rad, ficou dentro

Figura 4.25 - Gráfico para determinação experimental do momento de inércia (J'_b) e da constante elástica de torção (κ).



Coefficientes da curva experimental (—): angular $J'_b = (-46,98 \pm 1,55) \times 10^{-3}$ (kg·m²) e linear $\kappa = 1,425 \pm 0,038$ (N·m/rad); coeficientes da curva teórica (- - -): angular $J'_b = (-46,229 \pm 0,003) \times 10^{-3}$ (kg·m²) e linear $\kappa = 1,4684$ (N·m/rad).

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.11 - Valores teóricos e experimentais do momento de inércia J'_b e da constante elástica de torção κ , e o erro relativo percentual entre eles.

	Teórico	Experimental	Erro relativo percentual
J'_b (kg·m ²)	$(46,229 \pm 0,003) \times 10^{-3}$	$(46,98 \pm 1,55) \times 10^{-3}$	$1,62 \pm 0,05$ %
κ (N·m/rad)	$1,4684 \pm 0,1468$	$1,425 \pm 0,038$	$2,96 \pm 0,08$ %

Fonte: Produção do autor.

da faixa dos valores teóricos que vai de 1,3216 a 1,6152 N·m/rad.

4.4.1.2 Determinação de J_b'' e κ'

Observou-se que a faixa de medição de impulso, possível na configuração da balança com J_b' , era de ≈ 14 a $72 \mu\text{N}\cdot\text{s}$ (o cálculo destes valores será mostrado no item 4.4.2.1), e portanto, aquém da desejada (20 a $150 \mu\text{N}\cdot\text{s}$). Uma das formas de se resolver este problema é diminuir a distância dos quatro eletrodos e dos dois suportes em relação ao eixo de rotação da balança de empuxo (que era cerca de $0,267 \pm 0,001$ e mudou para $0,246 \pm 0,001$), o que faz mudar também o momento de inércia do braço da balança, de J_b' para J_b'' .

Para se determinar o valor do novo momento de inércia (J_b'') e da nova constante elástica de torção (κ') experimentais, foram realizados os mesmos testes descritos anteriormente para J_b' e κ , mas com um menor número de pontos, a fim de tornar o processo de obtenção de J_b'' e κ' mais dinâmico em relação ao anterior, reduzindo-se o tempo para a realização dos experimentos. Os novos valores de ($J_P' \cdot \omega'^2$) e ω'^2 estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Pontos para se obter graficamente os valores de J_b'' e κ' , devido à redução da distância entre as massas presas ao braço da balança e o eixo de rotação.

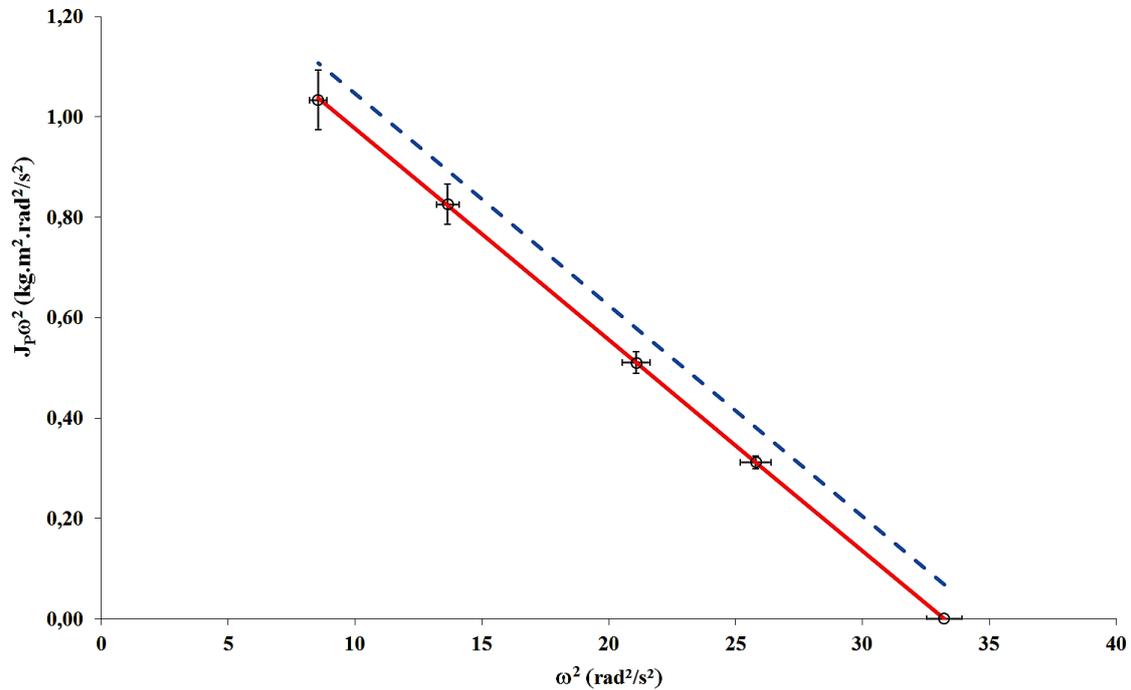
Ponto	$J_P' \cdot \omega'^2$ (kg·m ² ·rad ² /s ²)	ω'^2 (rad ² /s ²)
1	0	$33,222 \pm 0,691$
2	$0,312 \pm 0,013$	$25,791 \pm 0,609$
3	$0,510 \pm 0,022$	$21,086 \pm 0,550$
4	$0,826 \pm 0,040$	$13,649 \pm 0,443$
5	$1,034 \pm 0,059$	$8,544 \pm 0,350$

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 4.12 mostra os valores de $J_P' \cdot \omega'^2$ (kg·m²·rad²/s²) com os respectivos valores de ω'^2 (rad²/s²) e a Figura 4.26 mostra o gráfico com os valores desta tabela. Os valores de J_b'' e κ' foram obtidos pelas Equações 3.12 e 3.13, respectivamente. As incertezas dos coeficientes angular ($\delta J_b''$) e linear ($\delta \kappa'$) foram calculados pelas Equações 3.15 e 3.16, respectivamente. As barras verticais e horizontais representam as incertezas dos valores do eixo das ordenadas e as horizontais a incertezas dos valores do eixo das abscissas.

Novamente, comparando-se os resultados experimentais de J_b'' e κ' (obtidos graficamente) com o valor teórico de J_b'' , que foi calculado com o auxílio do *software AutoDesk Inventor*[®] *Professional 2016* versão educacional, e com o valor teórico

Figura 4.26 - Gráfico para determinação experimental do novo momento de inércia (J_b'') e da nova constante elástica de torção (κ').



Coefficientes da curva experimental (—): angular $J_b'' = (-42,09 \pm 2,44) \times 10^{-3}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) e linear $\kappa' = 1,398 \pm 0,058$ ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$); coeficientes da curva teórica (- - -): angular $J_b'' = (-42,143 \pm 0,003) \times 10^{-3}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) e linear $\kappa' = 1,4684$ ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$).

Fonte: Produção do autor.

de κ' , fornecido pelo fabricante *Riverhawk Company*, obteve-se a Tabela 4.13, que mostra também o erro relativo percentual entre eles.

Tabela 4.13 - Valores teóricos e experimentais do novo momento de inércia (J_b'') e da nova constante elástica de torção (κ') e o erro relativo percentual entre eles.

	Teórico	Experimental	Erro relativo percentual
J_b'' ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	$(42,143 \pm 0,003) \times 10^{-3}$	$(42,09 \pm 2,44) \times 10^{-3}$	$0,126 \pm 0,007\%$
κ' ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	1,4684	$1,398 \pm 0,058$	$4,794 \pm 0,199\%$

Fonte: Produção do autor.

A constante linear κ' foi obtida com um número menor de pontos (5) do que o valor de κ (8) e por esse motivo, sua incerteza $\delta\kappa' = \pm 0,058$ (N·m/rad) aumentou em relação à incerteza $\delta\kappa$ (que era $\pm 0,038$ (N·m/rad)). O valor de κ' (1,398 N·m/rad) teve uma diferença maior em relação ao valor teórico do que o valor de κ (1,425 N·m/rad), mas mesmo assim ficou dentro da faixa dos valores teóricos que vai de 1,3216 a 1,6152 N·m/rad.

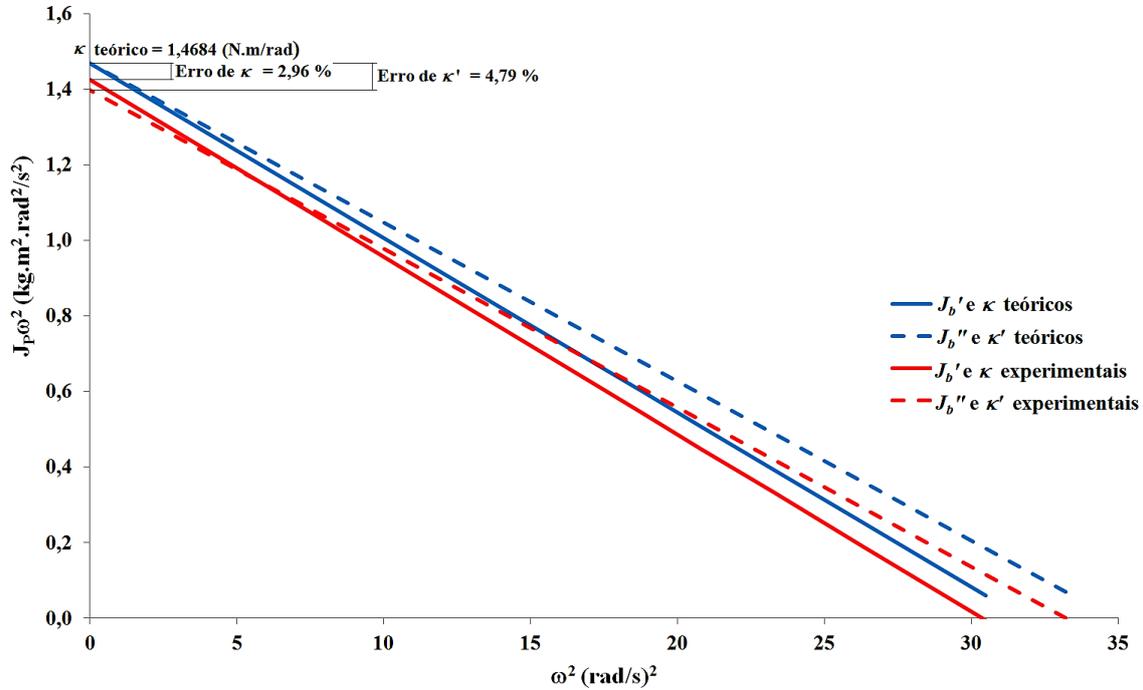
Os valores das frequências de oscilação do braço da balança, obtidos quando o momento de inércia do braço J'_b diminuiu para J''_b , aumentou, conforme era de se esperar, pois são grandezas inversamente proporcionais, conforme visto na Equação 1.27 e nos valores de ω^2 e ω'^2 das Tabelas 4.10 e 4.12, respectivamente.

O erro relativo percentual do novo momento de inércia, J''_b , foi de 0,126 %, menor do que o erro relativo da configuração anterior, J'_b , que era 1,62 %. Mas o erro relativo percentual da nova constante elástica de torção κ' , foi de 4,794 %, maior do que o erro relativo de κ , que era 2,96 %. Esse efeito da diminuição do erro relativo do momento de inércia, J'_b para J''_b , e do aumento do erro relativo da constante elástica de torção, κ para κ' , que ocorreu da primeira para a segunda configuração, pode ser visto graficamente na Figura 4.27.

Na Figura 4.27, as retas contínuas, azul e vermelha, representam os coeficientes angular, J'_b , e linear, κ , teóricos e experimentais, respectivamente. A diferença na inclinação entre as retas contínuas, teórica e experimental, mostra o erro relativo do momento de inércia (J'_b). A distância entre as retas (*offset*) corresponde ao erro da constante elástica de torção κ . Analogamente, as retas tracejadas, azul e vermelha, representam os coeficientes angular, J''_b , e linear, κ' , teóricos e experimentais, respectivamente. As retas tracejadas estão mais paralelas entre si do que as retas contínuas, mostrando que o erro de J''_b foi menor do que J'_b . No entanto, as retas tracejadas encontram-se mais distantes entre si do que as contínuas, pois o erro de κ' foi maior do que o erro de κ .

Diversos fatores podem ter ocorrido para justificar os valores dos erros encontrados para o momento de inércia e a constante elástica de torção, tais como: diferenças nas medidas das peças fabricadas para a balança de empuxo em relação ao que foi projetado, desalinhamento dos pivôs de torção no braço da balança (verticalmente e horizontalmente), diferenças no posicionamento dos pesos-padrão sobre os suportes em relação ao eixo de rotação da balança, diferenças de massas entre os eletrodos do DCE que causaria um desalinhamento do braço da balança, dentre outros.

Figura 4.27 - Comparação dos momentos de inércia J_b' e J_b'' , e das constantes elásticas de torção κ e κ' , teóricos e experimentais da balança de empuxo.



Fonte: Produção do autor.

4.4.2 Ensaios para medição do impulso - I_{bit}

Os ensaios para medição do impulso (I_{bit}) foram realizados para todos os pontos (de 1 a 8) da Tabela 4.8 com os eletrodos e os suportes a uma distância de $0,2670 \pm 0,0005$ m em relação ao eixo de rotação da balança de empuxo, que corresponde à configuração com os valores de J_b' e κ , e também para os pontos 1, 3, 5, 7 e 8 da Tabela 4.8 mas com os eletrodos e os suportes a uma distância de $0,2460 \pm 0,0005$ m em relação ao eixo de rotação (21 mm mais próximo ao eixo, ou seja, com um momento de inércia menor do braço da balança), que corresponde à nova configuração com os valores de J_b'' e κ' . Aplicando-se um impulso pelo DCE, que teve sua amplitude e largura medidos pelo canal #2 do osciloscópio digital modelo TDS5034B da *TEKTRONIX*, foi possível comparar esse valor do impulso aplicado com o valor do impulso medido pela balança de empuxo. A medição do impulso na balança é obtida pela Equação 3.6 através da medição dos parâmetros J (momento de inércia), f_{nat} (frequência natural de oscilação do braço da balança), Δx_{max} (vari-

ação linear do braço), r_T (distância entre o ponto de aplicação do empuxo e o eixo de rotação) e r_{sens} (distância entre o sensor óptico e o eixo de rotação).

4.4.2.1 Medição do impulso para a configuração da balança com J'_b e κ

Para cada grupo de pesos-padrão selecionado (cada grupo representa um ponto da Tabela 4.8) diversos pulsos foram aplicados variando-se a largura do pulso e sua amplitude através da variação da tensão sobre os eletrodos do DCE. Todos os cálculos dos parâmetros necessários para a medição do impulso (J , f_{nat} , Δx_{max} , r_T e r_{sens}) foram realizados conforme descrito no item 3.

A força F_E , aplicada à balança de empuxo, foi produzida pelo DCE devido à diferença de potencial entre seus eletrodos, U_E da fonte digital, e obtida com a calibração linearizada do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm (Figura 4.9). A calibração linearizada do DCE fornece a força (em μN) em função do quadrado da tensão aplicada (em V^2). As incertezas dos valores da força (δF_E) foram fornecidas pela Equação 4.4. A tensão da fonte (U_E) e a respectiva força eletrostática (F_E), produzida pelo DCE com esta tensão, encontram-se na Tabela 4.14.

Para cada valor de impulso aplicado ao braço da balança mediu-se, através do canal #1 do osciloscópio digital, a FFT e os valores médio e máximo da tensão do sensor óptico. A FFT da tensão do sensor forneceu a frequência de oscilação da balança. Os valores médio e máximo foram medidos para que, através da curva do sensor óptico (Figura 3.2), pudesse ser calculado o deslocamento linear máximo do braço da balança (Δx_{max}). As incertezas dos sinais de frequência foram obtidas com a Equação 3.17 e as incertezas dos valores da tensão do osciloscópio, conforme mostrado na Tabela 4.1.

A Tabela 4.15 mostra a tensão na saída do sensor óptico (U_i), a distância correspondente do braço da balança (x_i) (Equação 4.10) e o deslocamento Δx_{max} . O parâmetro x_i se refere à distância entre o sensor óptico e o braço da balança. O deslocamento, Δx_{max} , é a diferença entre os valores da distância do braço da balança x_1 e x_2 , devido à U_1 ($U_{médico}$) e U_2 ($U_{máximo}$), respectivamente. As incertezas δx_i foram obtidas pela combinação da incerteza da curva de calibração do sensor óptico ($\pm 1\%$) com a incerteza δU_i (± 1 mV) através da Equação 4.16.

$$\delta x_i = \left[\left(\frac{U_i + \delta U_i + 0,892}{0,084426 \times 10^6} \right) 1,01 - \left(\frac{U_i - \delta U_i + 0,892}{0,084426 \times 10^6} \right) 0,99 \right] / 2 \quad (4.16)$$

Tabela 4.14 - Tensão da fonte (U_E) e a respectiva força eletrostática (F_E), produzida pelo DCE com esta tensão, obtida através da calibração linearizada do DCE, para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e J'_b .

U_E (V)	F_E (μ N)	
320,0000 \pm 0,0025	278,23 \pm 0,26	Ponto 1
300,0000 \pm 0,0025	244,54 \pm 0,23	
280,0000 \pm 0,0025	213,02 \pm 0,21	
250,0000 \pm 0,0025	169,82 \pm 0,17	
200,0000 \pm 0,0025	108,68 \pm 0,11	
330,0000 \pm 0,0025	295,89 \pm 0,28	Ponto 2
300,0000 \pm 0,0025	244,54 \pm 0,23	
280,0000 \pm 0,0025	213,02 \pm 0,21	
250,0000 \pm 0,0025	169,82 \pm 0,17	
200,0000 \pm 0,0025	108,68 \pm 0,11	
340,0000 \pm 0,0025	314,10 \pm 0,29	Ponto 3
340,0000 \pm 0,0025	314,10 \pm 0,29	
300,0000 \pm 0,0025	244,54 \pm 0,23	
260,0000 \pm 0,0025	183,68 \pm 0,18	
220,0000 \pm 0,0025	131,51 \pm 0,13	
350,0000 \pm 0,0025	332,84 \pm 0,31	Ponto 4
340,0000 \pm 0,0025	314,10 \pm 0,29	
300,0000 \pm 0,0025	244,54 \pm 0,23	
260,0000 \pm 0,0025	183,68 \pm 0,18	
360,0000 \pm 0,0025	352,14 \pm 0,33	Ponto 5
340,0000 \pm 0,0025	314,10 \pm 0,29	
300,0000 \pm 0,0025	244,54 \pm 0,23	
260,0000 \pm 0,0025	183,68 \pm 0,18	
360,0000 \pm 0,0025	352,14 \pm 0,33	Ponto 6
320,0000 \pm 0,0025	278,23 \pm 0,26	
280,0000 \pm 0,0025	213,02 \pm 0,21	
220,0000 \pm 0,0025	131,51 \pm 0,13	
380,0000 \pm 0,0025	392,35 \pm 0,36	Ponto 7
350,0000 \pm 0,0025	332,84 \pm 0,31	
300,0000 \pm 0,0025	244,54 \pm 0,23	
400,0000 \pm 0,0025	434,74 \pm 0,40	Ponto 8
350,0000 \pm 0,0025	332,84 \pm 0,31	
280,0000 \pm 0,0025	213,02 \pm 0,21	

Fonte: Produção do autor.

Que pode ser simplificada resultando em:

$$\delta x_i = \frac{0,01U_i + \delta U_i + 0,00892}{84426} \quad (4.17)$$

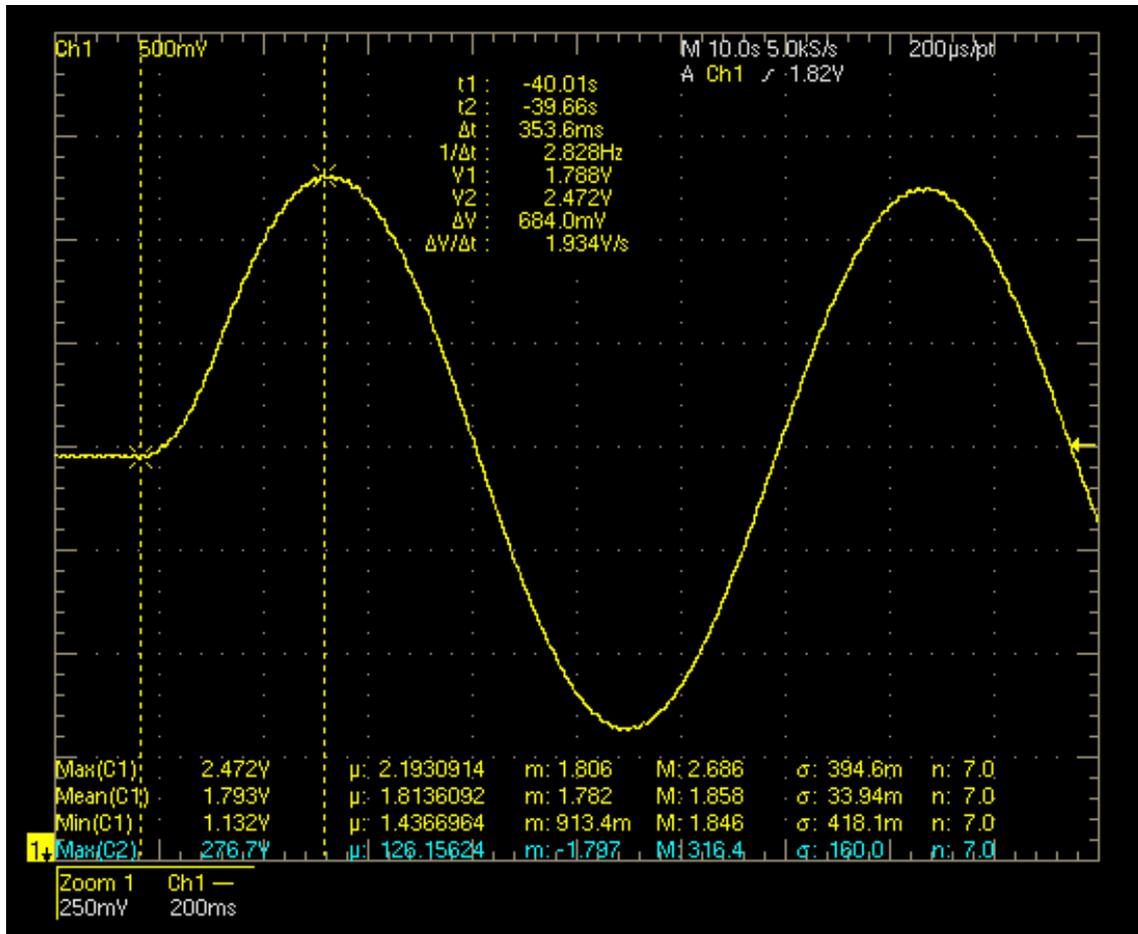
Tabela 4.15 - Tensão de saída do sensor óptico (U_i), distância do braço da balança de empuxo (x_i) e a variação Δx_{max} para J'_b .

U_1 (V)	U_2 (V)	x_1 (μm)	x_2 (μm)	Δx_{max} (μm)	
$1,777 \pm 0,001$	$2,658 \pm 0,001$	$31,61 \pm 0,33$	$42,05 \pm 0,43$	$10,44 \pm 0,76$	Ponto 1
$1,836 \pm 0,001$	$2,686 \pm 0,001$	$32,31 \pm 0,33$	$42,38 \pm 0,44$	$10,07 \pm 0,77$	
$1,788 \pm 0,001$	$2,472 \pm 0,001$	$31,74 \pm 0,33$	$39,85 \pm 0,41$	$8,10 \pm 0,74$	
$1,837 \pm 0,001$	$2,371 \pm 0,001$	$32,32 \pm 0,34$	$38,65 \pm 0,40$	$6,33 \pm 0,74$	
$1,797 \pm 0,001$	$2,110 \pm 0,001$	$31,85 \pm 0,33$	$35,56 \pm 0,37$	$3,71 \pm 0,70$	
$1,841 \pm 0,001$	$2,746 \pm 0,001$	$32,37 \pm 0,34$	$43,09 \pm 0,44$	$10,72 \pm 0,78$	Ponto 2
$1,798 \pm 0,001$	$2,520 \pm 0,001$	$31,86 \pm 0,33$	$40,41 \pm 0,42$	$8,55 \pm 0,75$	
$1,787 \pm 0,001$	$2,415 \pm 0,001$	$31,73 \pm 0,33$	$39,17 \pm 0,40$	$7,44 \pm 0,73$	
$1,766 \pm 0,001$	$2,248 \pm 0,001$	$31,48 \pm 0,33$	$37,19 \pm 0,38$	$5,71 \pm 0,71$	
$1,754 \pm 0,001$	$2,051 \pm 0,001$	$31,34 \pm 0,33$	$34,86 \pm 0,36$	$3,52 \pm 0,69$	
$1,860 \pm 0,001$	$2,728 \pm 0,001$	$32,60 \pm 0,34$	$42,88 \pm 0,44$	$10,28 \pm 0,78$	Ponto 3
$1,796 \pm 0,001$	$2,535 \pm 0,001$	$31,84 \pm 0,33$	$40,59 \pm 0,42$	$8,75 \pm 0,75$	
$1,846 \pm 0,001$	$2,530 \pm 0,001$	$32,43 \pm 0,34$	$40,53 \pm 0,42$	$8,10 \pm 0,76$	
$1,833 \pm 0,001$	$2,378 \pm 0,001$	$32,28 \pm 0,33$	$38,73 \pm 0,40$	$6,46 \pm 0,73$	
$1,803 \pm 0,001$	$2,163 \pm 0,001$	$31,92 \pm 0,33$	$36,19 \pm 0,37$	$4,26 \pm 0,70$	
$1,844 \pm 0,001$	$2,732 \pm 0,001$	$32,41 \pm 0,34$	$42,93 \pm 0,44$	$10,52 \pm 0,78$	Ponto 4
$1,799 \pm 0,001$	$2,578 \pm 0,001$	$31,87 \pm 0,33$	$41,10 \pm 0,42$	$9,23 \pm 0,75$	
$1,802 \pm 0,001$	$2,458 \pm 0,001$	$31,91 \pm 0,33$	$39,68 \pm 0,41$	$7,77 \pm 0,74$	
$1,798 \pm 0,001$	$2,354 \pm 0,001$	$31,86 \pm 0,33$	$38,45 \pm 0,40$	$6,59 \pm 0,73$	
$1,811 \pm 0,001$	$2,619 \pm 0,001$	$32,02 \pm 0,33$	$41,59 \pm 0,43$	$9,57 \pm 0,76$	Ponto 5
$1,827 \pm 0,001$	$2,521 \pm 0,001$	$32,21 \pm 0,33$	$40,43 \pm 0,42$	$8,22 \pm 0,75$	
$1,825 \pm 0,001$	$2,483 \pm 0,001$	$32,18 \pm 0,33$	$39,98 \pm 0,41$	$7,94 \pm 0,74$	
$1,822 \pm 0,001$	$2,367 \pm 0,001$	$31,15 \pm 0,33$	$38,60 \pm 0,40$	$6,46 \pm 0,73$	
$1,848 \pm 0,001$	$2,658 \pm 0,001$	$32,45 \pm 0,34$	$42,05 \pm 0,43$	$9,59 \pm 0,77$	Ponto 6
$1,833 \pm 0,001$	$2,529 \pm 0,001$	$32,28 \pm 0,33$	$40,52 \pm 0,42$	$8,24 \pm 0,75$	
$1,848 \pm 0,001$	$2,435 \pm 0,001$	$32,45 \pm 0,34$	$39,41 \pm 0,41$	$6,95 \pm 0,75$	
$1,807 \pm 0,001$	$2,083 \pm 0,001$	$31,97 \pm 0,33$	$35,24 \pm 0,36$	$3,27 \pm 0,69$	
$1,858 \pm 0,001$	$2,529 \pm 0,001$	$32,57 \pm 0,34$	$41,71 \pm 0,43$	$9,13 \pm 0,77$	Ponto 7
$1,810 \pm 0,001$	$2,435 \pm 0,001$	$32,00 \pm 0,33$	$39,40 \pm 0,41$	$7,39 \pm 0,74$	
$1,827 \pm 0,001$	$2,083 \pm 0,001$	$32,21 \pm 0,33$	$37,99 \pm 0,39$	$5,78 \pm 0,72$	
$1,799 \pm 0,001$	$2,564 \pm 0,001$	$31,87 \pm 0,33$	$40,94 \pm 0,42$	$9,06 \pm 0,75$	Ponto 8
$1,829 \pm 0,001$	$2,423 \pm 0,001$	$32,23 \pm 0,33$	$39,27 \pm 0,40$	$7,04 \pm 0,73$	
$1,812 \pm 0,001$	$2,150 \pm 0,001$	$32,03 \pm 0,33$	$36,03 \pm 0,37$	$4,00 \pm 0,70$	

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.28 mostra o resultado de um ensaio, medindo o sinal de saída do sensor óptico. Nesta figura são indicados os valores de tensão médio e máximo para o cálculo do Δx_{max} da Tabela 4.15.

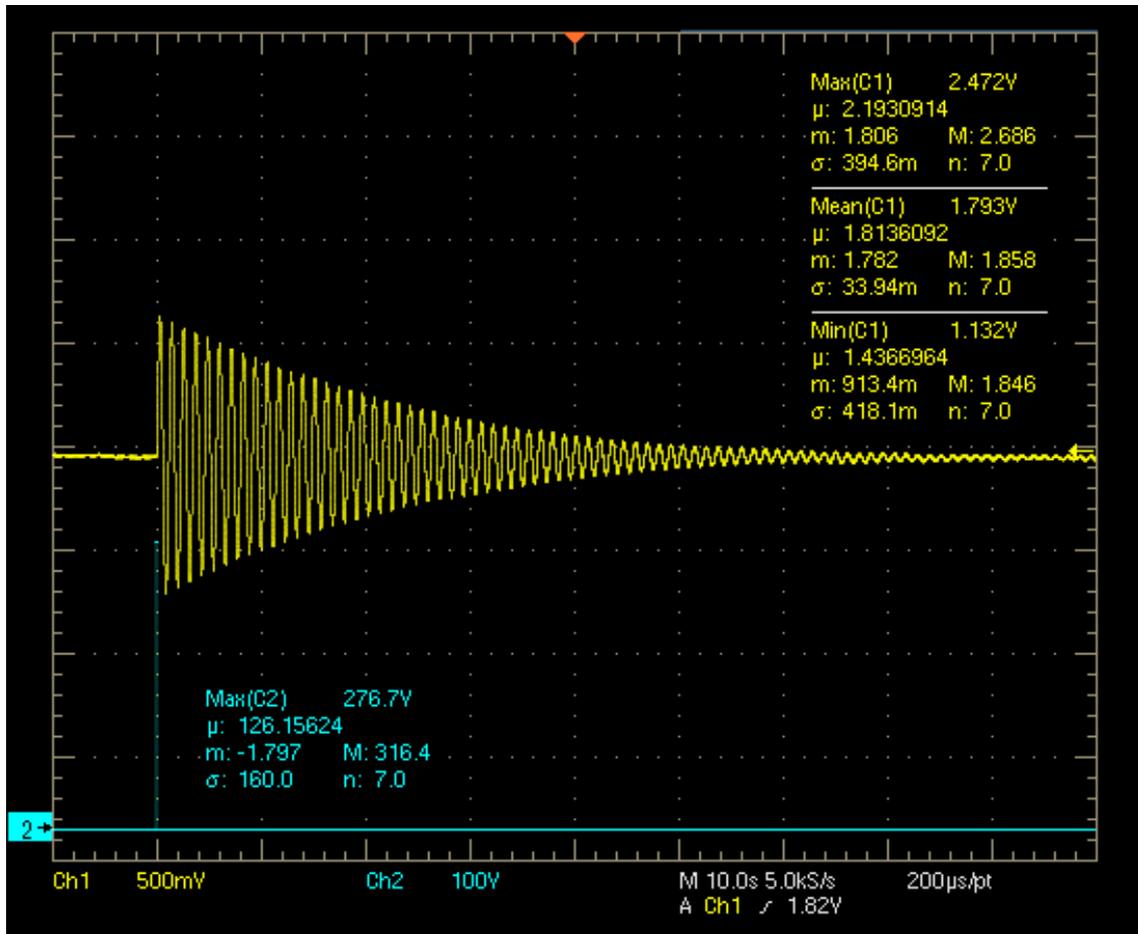
Figura 4.28 - Valores médio e máximo de tensão da saída do sensor óptico (para o cálculo de Δx_{max}) medido pelo canal #1 osciloscópio digital para J'_b .



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.29 é mostrado o resultado do ensaio anterior (Figura 4.28), com a tensão de saída do sensor (sinal de oscilação da balança de empuxo) no canal #1 do osciloscópio (em amarelo) e a tensão aplicada ao DCE durante o tempo Δt (impulso) no canal #2 (em azul).

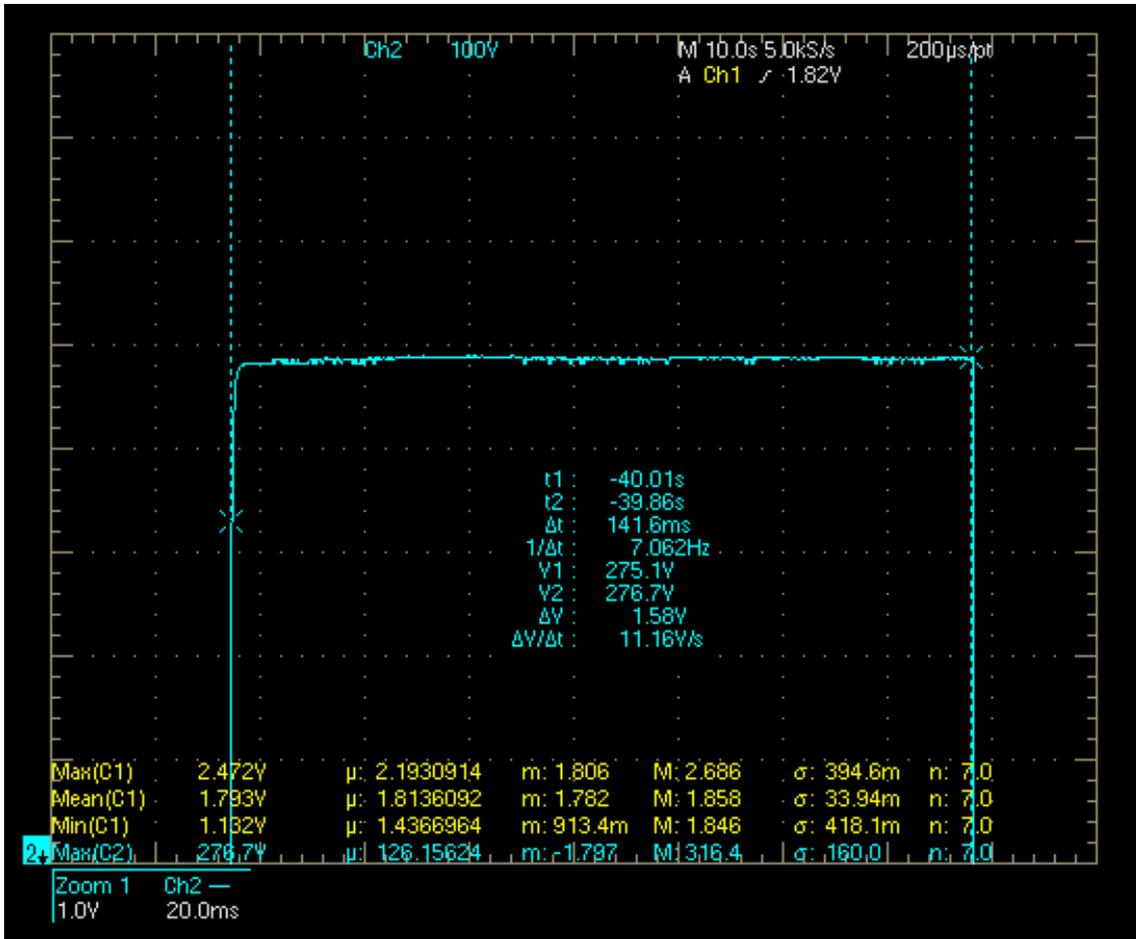
Figura 4.29 - Tensão de saída do sensor (canal #1 do osciloscópio, em amarelo) e a tensão aplicada ao DCE durante o tempo Δt (canal #2, em azul) para J'_b .



Fonte: Produção do autor.

O tempo Δt em que a força (F_E) foi aplicada, foi medido para se determinar o impulso do DCE e é mostrado (em detalhe) na Figura 4.30.

Figura 4.30 - Tensão aplicada no DCE (em detalhe), que produz uma força (F_E) durante o tempo Δt , gerando o impulso para J'_b .



Fonte: Produção do autor.

O impulso produzido pelo DCE e o calculado através dos parâmetros medidos pela balança de empuxo são apresentados na Tabela 4.16. Nesta Tabela, os pontos de 1 a 8 correspondem às massas dos pesos-padrão combinadas utilizadas, que foram listadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.16 - Comparação entre os impulsos aplicados pelo DCE e os medidos pela balança de empuxo com $r_T = r_{sens} = 0,2670 \pm 0,0005$ m e J'_b .

Força eletrostática produzida pelo DCE (μN)	Tempo de aplicação da força eletrostática Δt (ms)	Impulso produzido pelo DCE ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)	Impulso medido pela balança ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)	Erro relativo (%)	Momento de inércia total J ($\times 10^{-3}$) ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	Frequência natural f_{nat} (mHz)	Deslocamento máximo Δx_{max} (μm)	
278,23 \pm 0,26	141,2 \pm 0,2	39,29 \pm 0,07	38,0 \pm 3,0	3,37 \pm 0,08	46,98 \pm 1,55	878,6 \pm 9,5	10,44 \pm 0,76	Ponto 1
244,54 \pm 0,23	160,0 \pm 0,2	39,13 \pm 0,06	36,6 \pm 3,0	6,45 \pm 0,08	46,98 \pm 1,55	878,0 \pm 9,5	10,07 \pm 0,77	
213,02 \pm 0,21	141,6 \pm 0,2	30,16 \pm 0,05	29,5 \pm 2,7	2,33 \pm 0,10	46,98 \pm 1,55	878,2 \pm 9,5	8,10 \pm 0,74	
169,82 \pm 0,17	141,6 \pm 0,2	24,05 \pm 0,04	23,0 \pm 2,7	4,31 \pm 0,12	46,98 \pm 1,55	878,6 \pm 9,5	6,33 \pm 0,74	
108,68 \pm 0,11	126,4 \pm 0,2	13,74 \pm 0,03	13,5 \pm 2,5	1,67 \pm 0,19	46,98 \pm 1,55	880,0 \pm 9,5	3,71 \pm 0,70	
295,89 \pm 0,28	149,2 \pm 0,2	44,15 \pm 0,07	41,7 \pm 3,3	5,57 \pm 0,08	54,11 \pm 1,65	815,5 \pm 9,5	10,72 \pm 0,78	Ponto 2
244,54 \pm 0,23	141,2 \pm 0,2	34,53 \pm 0,06	33,3 \pm 3,1	3,47 \pm 0,09	54,11 \pm 1,65	817,3 \pm 9,5	8,55 \pm 0,75	
213,02 \pm 0,21	141,6 \pm 0,2	30,16 \pm 0,05	29,0 \pm 3,0	3,92 \pm 0,10	54,11 \pm 1,65	817,0 \pm 9,5	7,44 \pm 0,73	
169,82 \pm 0,17	134,0 \pm 0,2	22,76 \pm 0,04	22,2 \pm 2,8	2,29 \pm 0,13	54,11 \pm 1,65	816,7 \pm 9,5	5,71 \pm 0,71	
108,68 \pm 0,11	126,4 \pm 0,2	13,74 \pm 0,03	13,7 \pm 2,7	0,14 \pm 0,20	54,11 \pm 1,65	817,7 \pm 9,5	3,52 \pm 0,69	
314,10 \pm 0,29	140,4 \pm 0,2	44,10 \pm 0,08	42,5 \pm 3,4	3,51 \pm 0,08	61,24 \pm 1,75	766,8 \pm 9,5	10,28 \pm 0,78	Ponto 3
314,10 \pm 0,29	113,6 \pm 0,2	35,68 \pm 0,07	36,2 \pm 3,2	1,43 \pm 0,09	61,24 \pm 1,75	766,1 \pm 9,5	8,75 \pm 0,75	
244,54 \pm 0,23	141,2 \pm 0,2	34,53 \pm 0,06	33,5 \pm 3,2	2,86 \pm 0,10	61,24 \pm 1,75	767,1 \pm 9,5	8,10 \pm 0,76	
183,68 \pm 0,18	149,3 \pm 0,2	27,42 \pm 0,05	26,7 \pm 3,1	2,49 \pm 0,12	61,24 \pm 1,75	767,5 \pm 9,5	6,46 \pm 0,73	
131,51 \pm 0,13	133,6 \pm 0,2	17,57 \pm 0,03	17,8 \pm 2,9	1,11 \pm 0,17	61,24 \pm 1,75	771,9 \pm 9,5	4,26 \pm 0,70	
332,84 \pm 0,31	141,6 \pm 0,2	47,13 \pm 0,08	45,9 \pm 3,6	2,56 \pm 0,08	68,37 \pm 1,85	724,6 \pm 9,5	10,52 \pm 0,78	Ponto 4
314,10 \pm 0,29	130,0 \pm 0,2	40,83 \pm 0,07	40,3 \pm 3,5	1,27 \pm 0,09	68,37 \pm 1,85	725,1 \pm 9,5	9,23 \pm 0,75	
244,54 \pm 0,23	140,8 \pm 0,2	34,43 \pm 0,06	34,0 \pm 3,3	1,17 \pm 0,10	68,37 \pm 1,85	726,8 \pm 9,5	7,77 \pm 0,74	
183,68 \pm 0,18	159,6 \pm 0,2	29,31 \pm 0,05	28,8 \pm 3,2	1,62 \pm 0,11	68,37 \pm 1,85	726,8 \pm 9,5	6,59 \pm 0,73	
352,14 \pm 0,33	124,8 \pm 0,2	43,95 \pm 0,08	43,9 \pm 3,7	0,09 \pm 0,08	75,49 \pm 1,95	689,5 \pm 9,5	9,57 \pm 0,76	
244,54 \pm 0,29	156,0 \pm 0,2	38,15 \pm 0,06	37,8 \pm 3,6	0,93 \pm 0,10	75,49 \pm 1,95	691,0 \pm 9,5	8,22 \pm 0,75	Ponto 5
314,10 \pm 0,23	113,6 \pm 0,2	35,68 \pm 0,07	35,8 \pm 3,5	0,36 \pm 0,10	75,49 \pm 1,95	690,5 \pm 9,5	7,79 \pm 0,74	
183,68 \pm 0,18	160,4 \pm 0,2	29,46 \pm 0,05	29,7 \pm 3,4	0,96 \pm 0,12	75,49 \pm 1,95	692,5 \pm 9,5	6,46 \pm 0,73	
352,14 \pm 0,33	128,4 \pm 0,2	45,21 \pm 0,08	46,1 \pm 3,9	2,03 \pm 0,09	82,62 \pm 2,05	660,3 \pm 9,5	9,59 \pm 0,77	Ponto 6
278,23 \pm 0,26	140,8 \pm 0,2	39,17 \pm 0,07	39,7 \pm 3,7	1,34 \pm 0,10	82,62 \pm 2,05	661,3 \pm 9,5	8,24 \pm 0,75	
213,02 \pm 0,21	155,6 \pm 0,2	33,15 \pm 0,05	33,7 \pm 3,7	1,61 \pm 0,11	82,62 \pm 2,05	665,2 \pm 9,5	6,95 \pm 0,75	
131,51 \pm 0,13	116,8 \pm 0,2	15,36 \pm 0,03	16,0 \pm 3,4	4,31 \pm 0,21	82,62 \pm 2,05	673,0 \pm 9,5	3,27 \pm 0,69	
392,35 \pm 0,36	132,0 \pm 0,2	51,79 \pm 0,09	52,4 \pm 4,6	1,09 \pm 0,09	118,27 \pm 2,55	550,0 \pm 9,5	9,13 \pm 0,77	Ponto 7
332,84 \pm 0,31	124,8 \pm 0,2	41,54 \pm 0,08	42,5 \pm 4,3	2,27 \pm 0,10	118,27 \pm 2,55	551,4 \pm 9,5	7,39 \pm 0,74	
244,54 \pm 0,23	132,8 \pm 0,2	32,47 \pm 0,06	33,2 \pm 4,2	2,36 \pm 0,13	118,27 \pm 2,55	551,7 \pm 9,5	5,78 \pm 0,72	
434,74 \pm 0,40	140,8 \pm 0,2	61,21 \pm 0,10	65,7 \pm 5,7	7,36 \pm 0,09	189,56 \pm 3,55	434,1 \pm 9,5	9,06 \pm 0,75	Ponto 8
332,84 \pm 0,31	141,1 \pm 0,2	46,96 \pm 0,08	51,2 \pm 5,5	9,05 \pm 0,11	189,56 \pm 3,55	435,7 \pm 9,5	7,04 \pm 0,73	
213,02 \pm 0,21	126,0 \pm 0,2	26,84 \pm 0,05	29,2 \pm 5,1	8,65 \pm 0,18	189,56 \pm 3,55	436,0 \pm 9,5	4,00 \pm 0,70	

Fonte: Produção do autor.

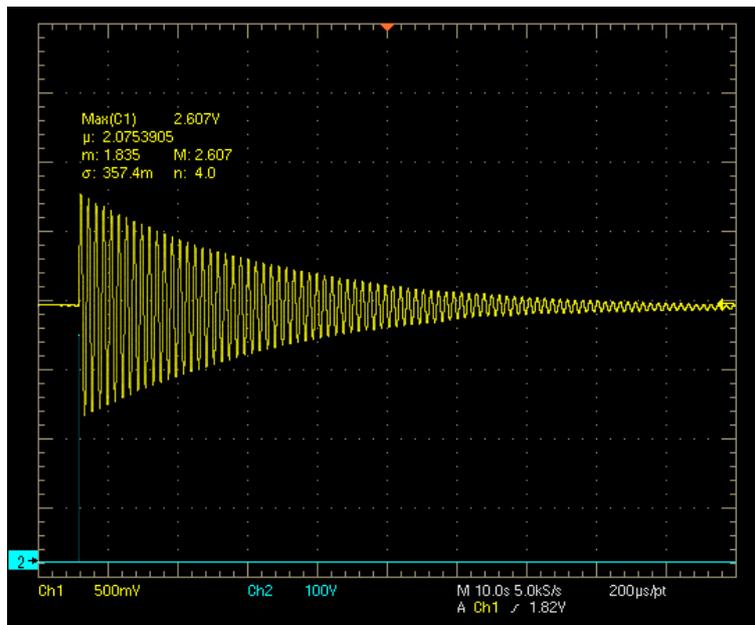
Aumentando-se o momento de inércia da balança (J), através do aumento da massa dos pesos-padrão sobre os suportes, diminui-se sua frequência natural (f_{nat}),

conforme visto na Tabela 4.16. O aumento do momento de inércia também permite que um impulso maior possa ser medido pela balança de empuxo para a mesma região linear do sensor óptico. Na Tabela 4.16 para o menor valor de J ($(46,98 \pm 1,55) \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$) foi possível se medir impulsos de $\approx 36 \mu\text{N}\cdot\text{s}$, enquanto que para um valor maior de J ($(189,56 \pm 3,55) \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$) o impulso medido chegou a $\approx 66 \mu\text{N}\cdot\text{s}$.

Assim como a frequência, o amortecimento da oscilação da balança ($\exp(-\frac{\lambda}{2J})$) também é inversamente proporcional ao momento de inércia (J). Esse efeito pode ser visto comparando-se as Figuras 4.31 e 4.32, que mostram os sinais de tensão do sensor, correspondentes à oscilação da balança de empuxo, com valores máximos de $2,607 \pm 0,001 \text{ V}$ e $2,565 \pm 0,001 \text{ V}$, respectivamente.

A Figura 4.31 representa um teste sem nenhum peso-padrão (apenas o braço da balança e os eletrodos do DCE, na configuração com J_b''), por isto, foi obtido o menor valor de momento de inércia ($J_1 = (42,09 \pm 2,44) \times 10^{-3} \text{ (kg}\cdot\text{m}^2)$) e uma das maiores frequências de oscilação ($f_{nat(1)} = 915,2 \pm 9,5 \text{ mHz}$). O tempo de relaxação (t_{R1}) da balança foi de $\approx 100 \text{ s}$.

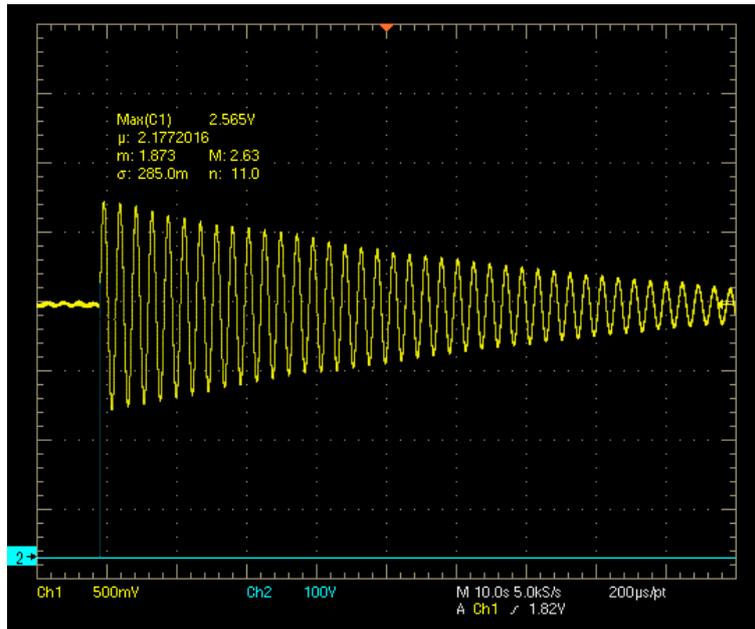
Figura 4.31 - Tensão do sensor (V) em função do tempo (s) para o momento de inércia J_1 e tempo de relaxação $t_{R1} \approx 100 \text{ (s)}$.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.32 mostra-se um teste com um peso-padrão de ≈ 1 kg (além dos eletrodos do DCE, na configuração com J'_b), obtendo-se o maior valor de momento de inércia ($J_2 = (189,56 \pm 3,55) \times 10^{-3}$ (kg·m²)) e uma das menores frequências ($f_{nat(2)} = 434,1 \pm 9,5$ mHz). O tempo de relaxação (t_{R2}) foi muito maior do que 100 s.

Figura 4.32 - Tensão do sensor (V) em função do tempo (s) para o momento de inércia J_2 e tempo de relaxação $t_{R2} \gg 100$ (s).



Fonte: Produção do autor.

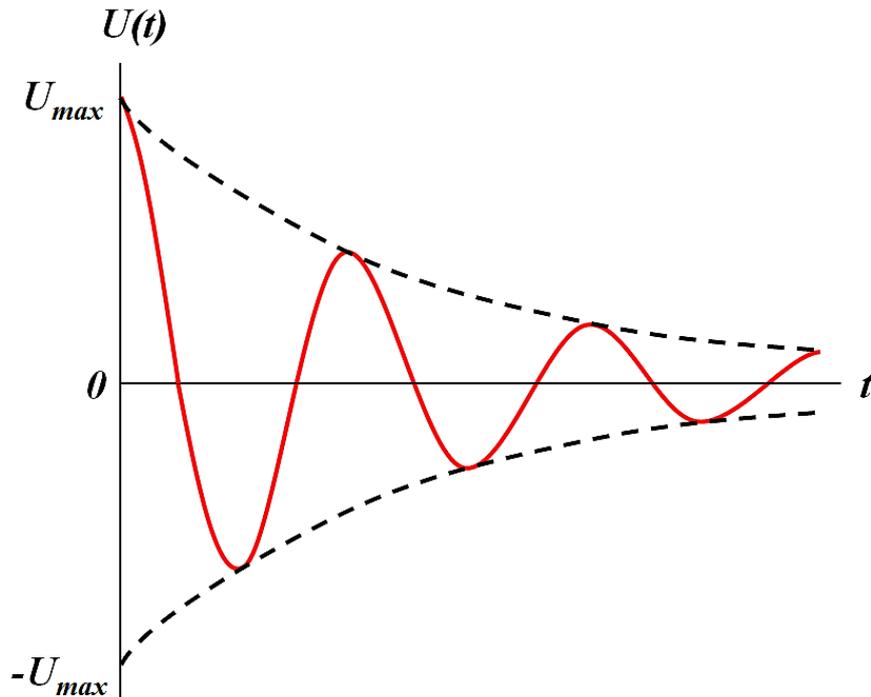
A Figura 4.33 mostra o decaimento exponencial da tensão de saída do sensor óptico, $U(t)$, ao longo do tempo devido ao coeficiente de atrito, λ , da balança de empuxo.

O coeficiente de amortecimento λ pode ser calculado a partir da Equação 4.18, que representa o decaimento exponencial da oscilação do braço da balança de empuxo.

$$U(t) = \pm U_{max} e^{-\left(\frac{\lambda}{2J}\right)t} \quad (4.18)$$

Medindo-se os valores da tensão U_{max} ($V1$) e $U(t)$ ($V2$) nos instantes de tempo $t1$ e $t2$, respectivamente, para um determinado momento de inércia J , pode-se obter

Figura 4.33 - Decaimento exponencial da tensão de saída do sensor óptico ($U(t)$) ao longo do tempo devido ao coeficiente de atrito (λ) da balança de empuxo.

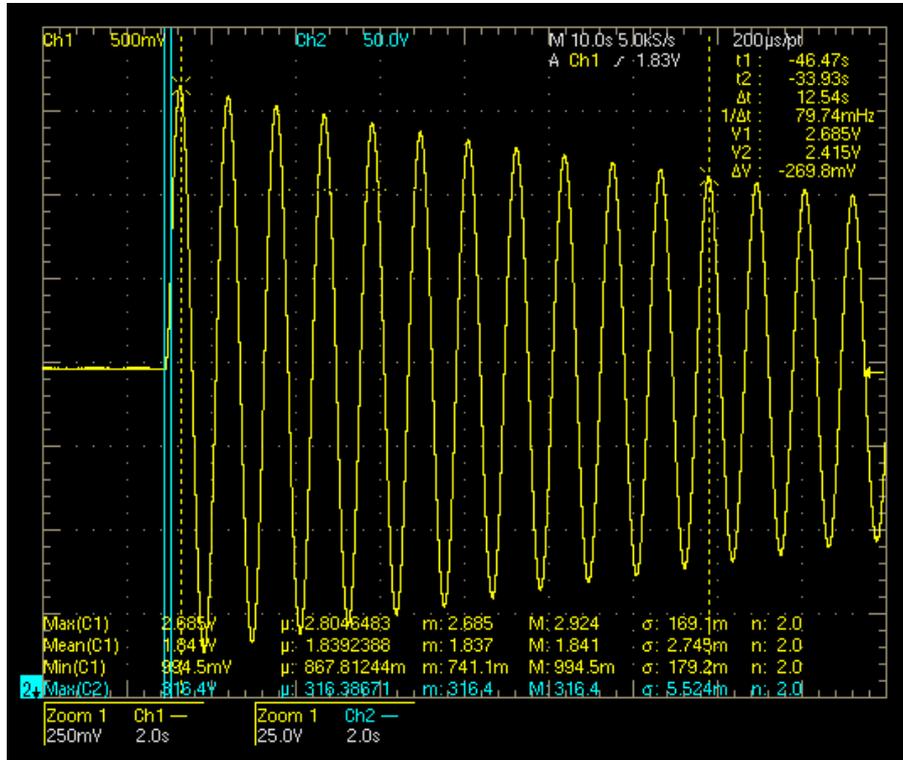


A curva contínua (—) representa: $U(t) = U_{max}e^{-\left(\frac{\lambda}{2J}\right)t}\cos(\omega t)$; a curva tracejada (- - -) representa o decaimento exponencial: $U(t) = \pm U_{max}e^{-\left(\frac{\lambda}{2J}\right)t}$, que ocorre devido ao atrito.

Fonte: Produção do autor.

o gráfico do decaimento exponencial do sinal de tensão do sensor óptico e a partir do valor do expoente de e ($\lambda/2J$), medido graficamente, calcular o valor de λ . A Figura 4.34 mostra os valores da tensão máxima (U_{max}) e da tensão $U(t)$ em um instante de tempo t escolhido aleatoriamente para a determinação do coeficiente de atrito λ_1 para um momento de inércia J_1 .

Figura 4.34 - Tensão máxima $V1$ (U_{max}) e tensão $V2$ ($U(t)$) em um instante de tempo $t2$, escolhido aleatoriamente para a determinação do coeficiente de atrito λ_1 para um momento de inércia J_1 .



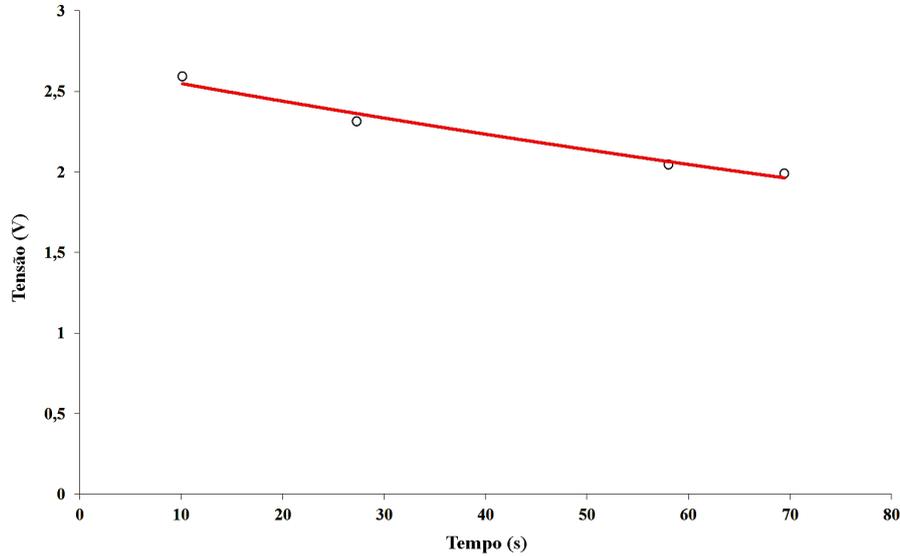
Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.35 mostra o decaimento exponencial experimental da tensão do sensor óptico $U(t)$ em função do tempo, devido ao coeficiente de atrito λ_1 da balança de empuxo para o momento de inércia J_1 .

Observando-se o expoente de e da Figura 4.35, verifica-se que $\lambda_1/2J_1 = 0,0044$. Como $J_1 = (46,98 \pm 1,55) \times 10^{-3}$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) o valor de λ_1 será $(41,24 \pm 1,36) \times 10^{-5}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$. A incerteza $\delta\lambda_1$ foi obtida pela Equação 4.19 (TAYLOR, 1997), onde β_i é um número exato. Para λ_1 , β_1 será igual ao produto de 0,0044 por 2 (valores exatos).

$$\delta\lambda_i = \beta_i\delta J_i \quad (4.19)$$

Figura 4.35 - Decaimento exponencial experimental da tensão do sensor óptico $U(t)$ em função do tempo, devido ao coeficiente de atrito λ_1 da balança de empuxo para o momento de inércia J_1 .



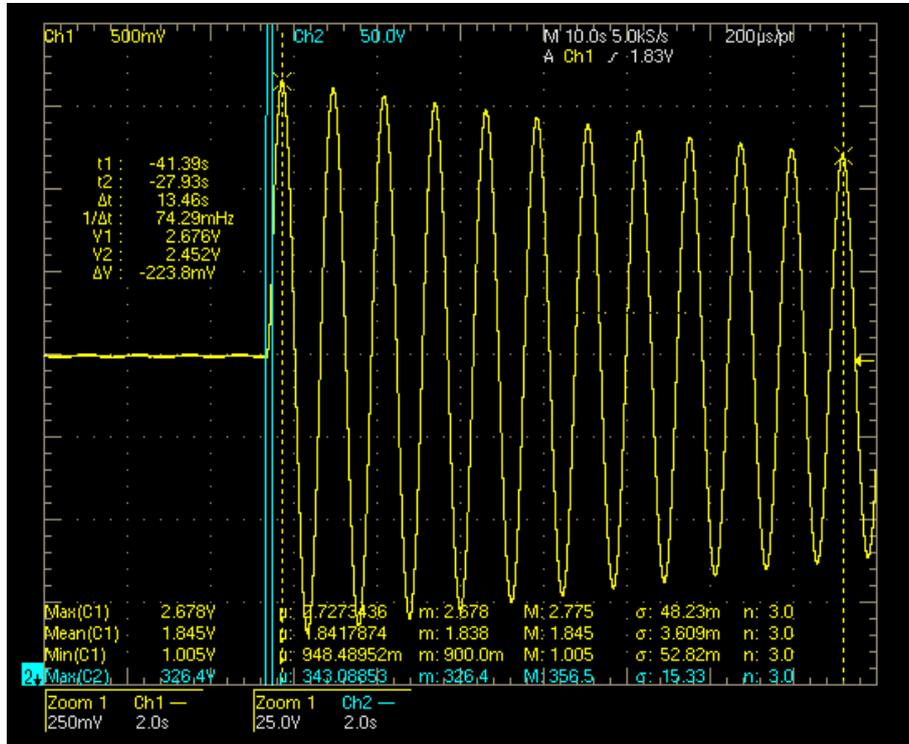
Equação da curva: Tensão (V) = $2,6633e^{-0,0044t}$ ($R^2 = 0,9769$).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.36 mostra novos valores da tensão máxima (U_{max}) e da tensão $U(t)$ em um instante de tempo t , escolhido aleatoriamente, para a determinação do novo coeficiente de atrito λ_2 , agora com um momento de inércia $J_2 > J_1$.

Refazendo-se o decaimento exponencial experimental, mostrado na Figura 4.37, obtido a partir dos novos valores de tensão e tempo medidos (Figura 4.36), para o momento de inércia J_2 , é possível obter o valor de λ_2 .

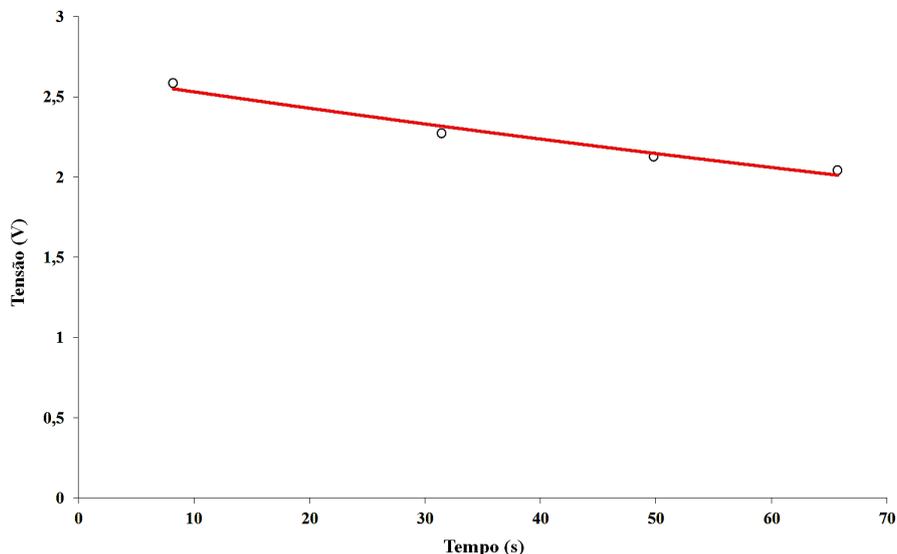
Figura 4.36 - Tensão máxima $V1$ (U_{max}) e tensão $V2$ ($U(t)$) em um instante de tempo $t2$, escolhido aleatoriamente para a determinação do coeficiente de atrito λ_2 para um momento de inércia J_2 .



Fonte: Produção do autor.

O expoente de e , da Figura 4.37, é $\lambda_2/2J_2 = 0,0041$ ($\lambda_2 > \lambda_1$). O momento de inércia é $J_2 = (54,11 \pm 1,65) \times 10^{-3}$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) e, portanto, λ_2 será igual à $(44,58 \pm 1,35) \times 10^{-5}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$. A incerteza $\delta\lambda_2$ foi obtida pelo produto de 0,0041 e $2(\beta_2)$ por δJ_2 , conforme a Equação 4.19 (TAYLOR, 1997).

Figura 4.37 - Decaimento exponencial experimental da tensão do sensor óptico $U(t)$ em função do tempo, devido ao novo coeficiente de atrito λ_2 da balança de empuxo para o momento de inércia $J_2 > J_1$.



Equação da curva: Tensão (V) = $2,6375e^{-0,0041t}$ ($R^2 = 0,974$).

Fonte: Produção do autor.

Comparando-se o amortecimento $\lambda_1/2J_1$ com $\lambda_2/2J_2$ verifica-se que ao se aumentar o momento de inércia ($J_2 > J_1$) o amortecimento ($\lambda/2J$) diminuiu ($\lambda_2/2J_2 < \lambda_1/2J_1$) como esperado, pois $\lambda/2J$ e J são inversamente proporcionais.

Os coeficientes de amortecimento λ_1 e λ_2 , apresentaram uma diferença de $8,09 \pm 0,36 \%$, nos testes experimentais.

Para a configuração da balança de empuxo que deu origem aos dados da Tabela 4.16, a qual possuía os eletrodos e os suportes a uma distância de $0,2670 \pm 0,0005$ m em relação ao eixo de rotação da balança, o que gerou um J'_b experimental de $(46,98 \pm 1,55) \times 10^{-3}$ kg·m² e κ de $1,425 \pm 0,038$ N·m/rad, o menor valor de impulso que se mediu foi de $13,5 \pm 2,5$ μ N·s e o maior foi de $36,6 \pm 3,0$ μ N·s, valores considerados dentro da região linear do sensor óptico (± 10 μ m) e referentes ao ponto 1. Nesse caso, (ponto 1) nenhum peso-padrão foi utilizado, sendo que as massas sobre a balança de empuxo correspondiam aos quatro eletrodos e aos dois suportes. Para o caso real de testes com um *PPT*, apenas as massas dos suportes devem permanecer e portanto, as massas dos quatro eletrodos podem ser atribuídas à massa do *PPT* e do seu respectivo contra-peso. Cada eletrodo possui uma massa

de ≈ 55 g e assim, seria equivalente à um *PPT* com cerca de 110 g. Seguindo-se essa linha de pensamento, acrescentando-se as massas dos pesos-padrão (mostradas na Tabela 3.2) às massas dos eletrodos e com isso, aumentando-se o momento de inércia da balança (J), é possível simular as massas dos *PPTs* que poderiam ser testados na balança com esta configuração. Esses valores encontram-se listados na Tabela 4.17, que mostra também o valor do impulso máximo que pode ser medido para cada massa de *PPT*.

Tabela 4.17 - Momento de inércia (J), sua equivalência à massa do *PPT* (m_{PPT}) e o impulso máximo medido ($I_{bit_{max}}$) para J'_b .

Ponto	$J (\times 10^{-3})$ (kg· m ²)	m_{PPT} (g)	$I_{bit_{max}}$ (μ N·s)
1	46,98 \pm 1,55	111,0490 \pm 0,0004	36,36 \pm 2,73
2	54,11 \pm 1,65	161,0490 \pm 0,0005	39,90 \pm 2,93
3	61,24 \pm 1,75	211,0491 \pm 0,0006	40,96 \pm 3,14
4	68,37 \pm 1,85	261,0491 \pm 0,0007	43,56 \pm 3,31
5	75,49 \pm 1,95	311,0492 \pm 0,0007	45,69 \pm 3,48
6	82,62 \pm 2,05	361,0491 \pm 0,0008	47,66 \pm 3,71
7	118,27 \pm 2,55	611,049 \pm 0,002	57,32 \pm 4,42
8	189,56 \pm 3,55	1111,049 \pm 0,004	72,23 \pm 5,58

Fonte: Produção do autor.

Embora na Tabela 4.16 não apareça diretamente os valores do impulso medido pela balança de empuxo, para o caso onde o deslocamento linear do braço da balança seja máximo ($\Delta x_{max} = 10 \mu m$), os valores de impulso nesse caso ($I_{bit_{max}}$), mostrados na Tabela 4.17, foram obtidos pelo cálculo do coeficiente angular, a , das equações lineares, referentes aos gráficos com os valores de impulso (I_{bit}), no eixo das ordenadas e o deslocamento linear do braço da balança de empuxo (Δx), no eixo das abscissas (valores dos pontos de 1 a 8 da Tabela 4.16). Assim, para cada ponto torna-se possível obter o valor do impulso máximo, $I_{bit_{max}}$, para cada valor de J , sem que o sinal do sensor de deslocamento saia da sua região linear.

O cálculo do coeficiente angular (a) foi realizado com a Equação 3.12 sendo sua incerteza, δa obtida pela Equação 3.15. A Tabela 4.18 mostra os coeficientes angulares e os $I_{bit_{max}}$ correspondentes obtidos. As incertezas dos valores do impulso máximo, $\delta I_{bit_{max}}$, da Tabela 4.18 foram calculadas com a Equação 4.21, que combina a incerteza δy (de N amostras com o mesmo J , Equação 4.20) com a incerteza δx (que corresponde aos valores estimados de incerteza de Δx_{max} para $10 \mu m$) (TAYLOR, 1997).

$$\delta y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (y_i - ax_i)^2} \quad (4.20)$$

$$\delta I_{bit_{max}} = \sqrt{\delta y^2 + (a\delta\Delta x_{max})^2} \quad (4.21)$$

Tabela 4.18 - Coeficiente angular (a) e o impulso máximo ($I_{bit_{max}}$) calculados para $\Delta x = 10 \mu\text{m}$ com J'_b .

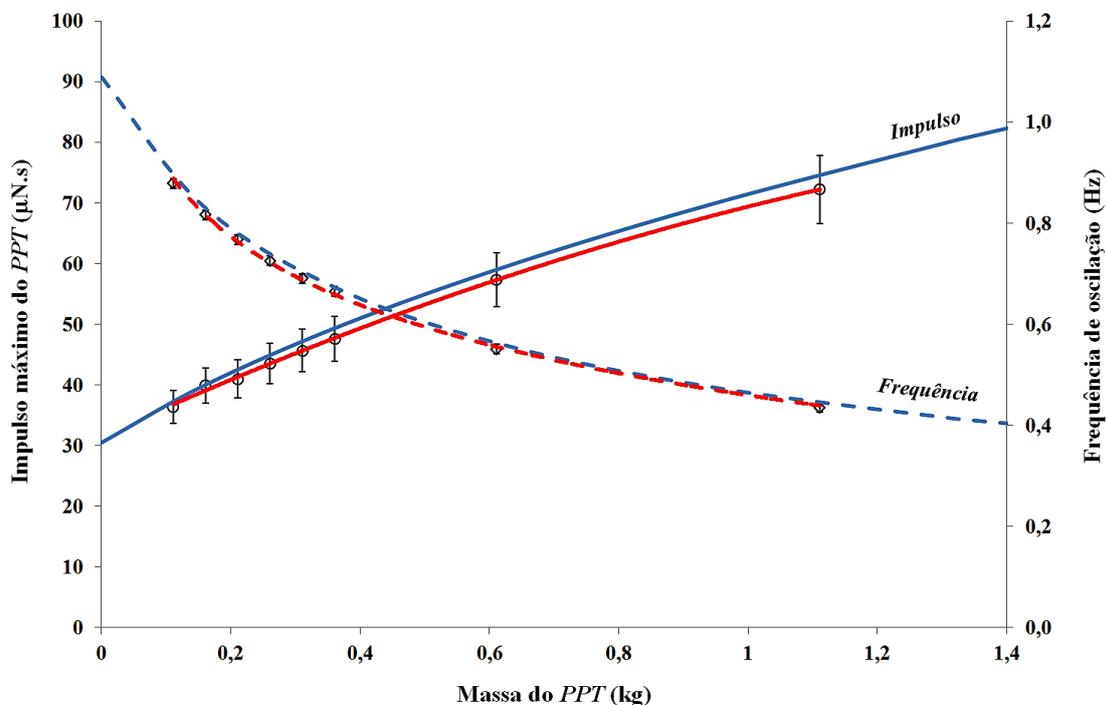
Ponto	a (kg/s)	$I_{bit_{max}}$ ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)
1	3,64 \pm 0,60	36,36 \pm 2,73
2	3,90 \pm 0,75	39,90 \pm 2,93
3	4,10 \pm 0,89	40,96 \pm 3,14
4	4,36 \pm 1,80	43,56 \pm 3,31
5	4,57 \pm 1,60	45,69 \pm 3,48
6	4,77 \pm 0,76	47,66 \pm 3,71
7	5,73 \pm 1,86	57,32 \pm 4,42
8	7,22 \pm 1,49	72,23 \pm 5,58

Fonte: Produção do autor.

Através dos valores de impulsos máximos e das massas dos *PPTs* da Tabela 4.17 foi possível construir um gráfico com o $I_{bit_{max}}$ no eixo das ordenadas e m_{PPT} no eixo das abscissas. Esse gráfico experimental (linha contínua em vermelho) pode ser comparado com o teórico (linha contínua em azul) obtido pela Equação 2.5 e visto na Figura 2.6. No eixo secundário vertical (à direita) estão os valores das frequências teórica (tracejado em azul) e experimental (tracejado em vermelho). Os valores das frequências teóricas foram obtidos pela Equação 2.6.

A Figura 4.38 mostra as curvas do impulso máximo teórico e experimental possível de ser medido pela balança de empuxo (com J'_b) em função da massa do *PPT* e a frequência de oscilação da balança.

Figura 4.38 - Impulso máximo teórico e experimental possível de ser medido pela balança de empuxo (com J'_b) em função da massa do PPT e a frequência de oscilação da balança.



Equação do impulso máximo experimental (—) em vermelho: $-11,207(m_{PPT})^2 + 49,141(m_{PPT}) + 31,464$ ($R^2 = 0,999$); equação da frequência experimental (- - -) em vermelho: $-0,195 \ln(m_{PPT}) + 0,4597$ ($R^2 = 0,9984$); impulso máximo teórico (—) em azul e frequência teórica (- - -) em azul.

Fonte: Produção do autor.

As barras verticais na curva experimental da Figura 4.38 representam as incertezas dos valores dos impulsos máximos e das frequências. As incertezas das massas dos PPTs não estão representadas por não serem visíveis, pois correspondem à 0,00036 % ($\delta m_i / m_i \times 100$). Os valores de δm_i e m_i foram mostrados na Tabela 4.17.

Os valores do impulso máximo teórico (em azul) do gráfico da Figura 4.38 foi obtido através da Equação 2.5 e utilizando-se os valores dos coeficientes mostrados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Valores dos coeficientes utilizados na Equação 2.5 para o gráfico da Figura 4.38.

Coeficiente	Descrição	Valor
r_F	Distância do ponto de aplicação da força ao eixo de rotação.	0,265 m
r_{sens}	Distância do sensor ao eixo de rotação.	0,265 m
Δx_{max}	Máximo deslocamento linear medido pelo sensor na sua região linear de operação.	10 μm
J_C ¹	Momento de inércia do conjunto formado pela massa do braço da balança e suportes.	$(31,3233 \pm 0,0004) \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
k	Constante elástica de torção dos 2 pivôs	1,4684 N·m/rad

Fonte: Produção do autor.

4.4.2.2 Medição do impulso para a nova configuração da balança com J_b'' e κ'

Conforme descrito no item 4.4.1.2, a faixa de impulso medida pela balança na configuração com J_b' (14 a 72 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$), ficou abaixo da esperada (20 a 150 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$) e por esse motivo a distância dos eletrodos e dos suportes em relação ao eixo de rotação foi reduzida, passou de $0,267 \pm 0,001$ para $0,246 \pm 0,001$, com o objetivo de se aumentar a faixa de medição de impulso. Isso gerou um novo momento de inércia, J_b'' , e uma nova constante elástica de torção, κ' .

Os ensaios feitos com esta nova configuração (J_b'') foram semelhantes aos descritos anteriormente (realizados para J_b'). Pulsos de tensão foram aplicados aos eletrodos do DCE (pela fonte de tensão digital) e através da sua calibração linearizada (Figura 4.9), determinou-se os valores da força eletrostática aplicada à balança. A Tabela 4.20 apresenta a tensão da fonte (U_E) e sua respectiva força eletrostática (F_E) produzida pelo DCE.

O canal #1 do osciloscópio digital, mediu a *FFT* e os valores médio e máximo da tensão do sensor óptico, fornecendo a frequência de oscilação da balança (f_{nat}) e seu deslocamento linear máximo (Δx_{max}). A Equação 3.17 forneceu as incertezas dos

¹O momento de inércia do conjunto (J_C) foi calculado com o auxílio do *software AutoDesk Inventor*[®] *Professional 2016* versão educacional.

Tabela 4.20 - Tensão da fonte (U_E) e sua respectiva força (F_E), produzida pelo DCE e obtida da calibração linearizada do DCE para $D_E = 1,00 \pm 0,01$ mm e J_b'' .

U_E (V)	F_E (μ N)	
330,0000 \pm 0,0025	295,89 \pm 0,28	Ponto 1
340,0000 \pm 0,0025	314,10 \pm 0,29	
300,0000 \pm 0,0025	244,54 \pm 0,23	
200,0000 \pm 0,0025	108,68 \pm 0,11	
350,0000 \pm 0,0025	332,84 \pm 0,31	Ponto 3
320,0000 \pm 0,0025	278,23 \pm 0,26	
220,0000 \pm 0,0025	131,51 \pm 0,13	
360,0000 \pm 0,0025	352,14 \pm 0,33	Ponto 5
330,0000 \pm 0,0025	295,89 \pm 0,28	
355,0000 \pm 0,0025	342,42 \pm 0,32	
400,0000 \pm 0,0025	434,74 \pm 0,40	Ponto 7
410,0000 \pm 0,0025	456,74 \pm 0,42	
300,0000 \pm 0,0025	244,54 \pm 0,23	
420,0000 \pm 0,0025	479,30 \pm 0,43	
430,0000 \pm 0,0025	502,39 \pm 0,45	Ponto 8
440,0000 \pm 0,0025	526,03 \pm 0,47	
450,0000 \pm 0,0025	550,21 \pm 0,49	
480,0000 \pm 0,0025	626,02 \pm 0,56	

Fonte: Produção do autor.

sinais de frequência e a Tabela 4.1 as incertezas dos valores da tensão do osciloscópio. A tensão na saída do sensor óptico (U_i), sua distância correspondente do braço da balança (x_i) (Equação 4.10) e o deslocamento Δx_{max} para J_b'' , são apresentados na Tabela 4.21.

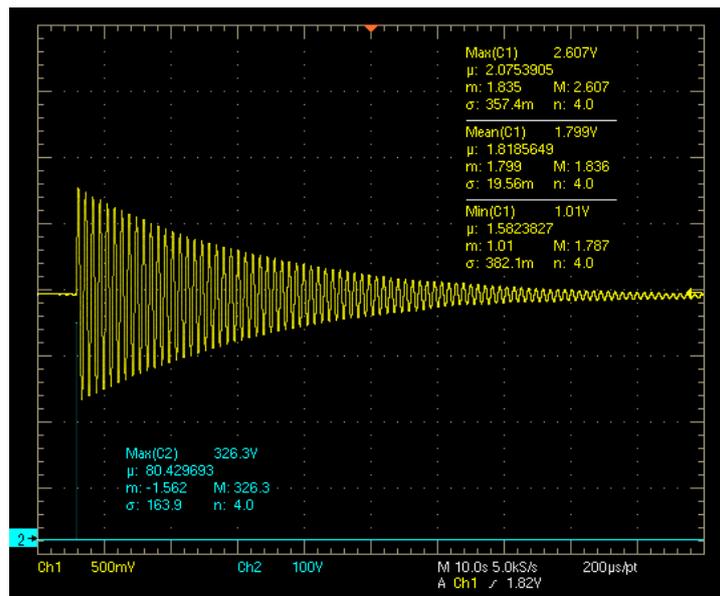
A Figura 4.39 mostra o resultado de um ensaio com a tensão de saída do sensor (canal #1, em amarelo) e a tensão aplicada ao DCE (canal #2, em azul).

Tabela 4.21 - Tensão de saída do sensor óptico (U_i), sua distância correspondente do braço da balança (x_i) e a variação Δx_{max} para J_b'' .

U_1 (V)	U_2 (V)	x_1 (μm)	x_2 (μm)	Δx_{max} (μm)	
$1,805 \pm 0,001$	$2,607 \pm 0,001$	$31,95 \pm 0,33$	$41,44 \pm 0,43$	$9,50 \pm 0,76$	Ponto 1
$1,815 \pm 0,001$	$2,639 \pm 0,001$	$32,06 \pm 0,33$	$41,82 \pm 0,43$	$9,76 \pm 0,76$	
$1,785 \pm 0,001$	$2,521 \pm 0,001$	$31,71 \pm 0,33$	$40,44 \pm 0,42$	$8,73 \pm 0,75$	
$1,765 \pm 0,001$	$2,086 \pm 0,001$	$31,47 \pm 0,33$	$35,27 \pm 0,36$	$3,80 \pm 0,69$	
$1,836 \pm 0,001$	$2,734 \pm 0,001$	$32,31 \pm 0,33$	$42,95 \pm 0,44$	$10,64 \pm 0,77$	Ponto 3
$1,808 \pm 0,001$	$2,603 \pm 0,001$	$31,98 \pm 0,33$	$41,40 \pm 0,43$	$9,42 \pm 0,76$	
$1,815 \pm 0,001$	$2,237 \pm 0,001$	$32,06 \pm 0,33$	$37,06 \pm 0,38$	$5,00 \pm 0,71$	
$1,808 \pm 0,001$	$2,700 \pm 0,001$	$31,98 \pm 0,33$	$42,55 \pm 0,44$	$10,57 \pm 0,77$	Ponto 5
$1,804 \pm 0,001$	$2,492 \pm 0,001$	$31,93 \pm 0,33$	$40,083 \pm 0,41$	$8,15 \pm 0,74$	
$1,833 \pm 0,001$	$2,617 \pm 0,001$	$32,28 \pm 0,33$	$41,56 \pm 0,43$	$9,29 \pm 0,76$	
$1,810 \pm 0,001$	$2,528 \pm 0,001$	$32,00 \pm 0,33$	$40,51 \pm 0,42$	$8,50 \pm 0,75$	Ponto 7
$1,859 \pm 0,001$	$2,619 \pm 0,001$	$32,58 \pm 0,34$	$41,59 \pm 0,43$	$9,00 \pm 0,77$	
$1,843 \pm 0,001$	$2,226 \pm 0,001$	$32,40 \pm 0,34$	$39,93 \pm 0,38$	$4,54 \pm 0,72$	
$1,835 \pm 0,001$	$2,759 \pm 0,001$	$32,30 \pm 0,33$	$43,25 \pm 0,44$	$10,94 \pm 0,77$	
$1,863 \pm 0,001$	$2,532 \pm 0,001$	$32,63 \pm 0,34$	$40,56 \pm 0,42$	$7,92 \pm 0,76$	Ponto 8
$1,838 \pm 0,001$	$2,516 \pm 0,001$	$32,34 \pm 0,34$	$40,37 \pm 0,42$	$8,03 \pm 0,76$	
$1,853 \pm 0,001$	$2,585 \pm 0,001$	$32,51 \pm 0,34$	$41,18 \pm 0,42$	$8,67 \pm 0,76$	
$1,901 \pm 0,001$	$2,738 \pm 0,001$	$33,08 \pm 0,34$	$43,00 \pm 0,44$	$9,91 \pm 0,78$	

Fonte: Produção do autor.

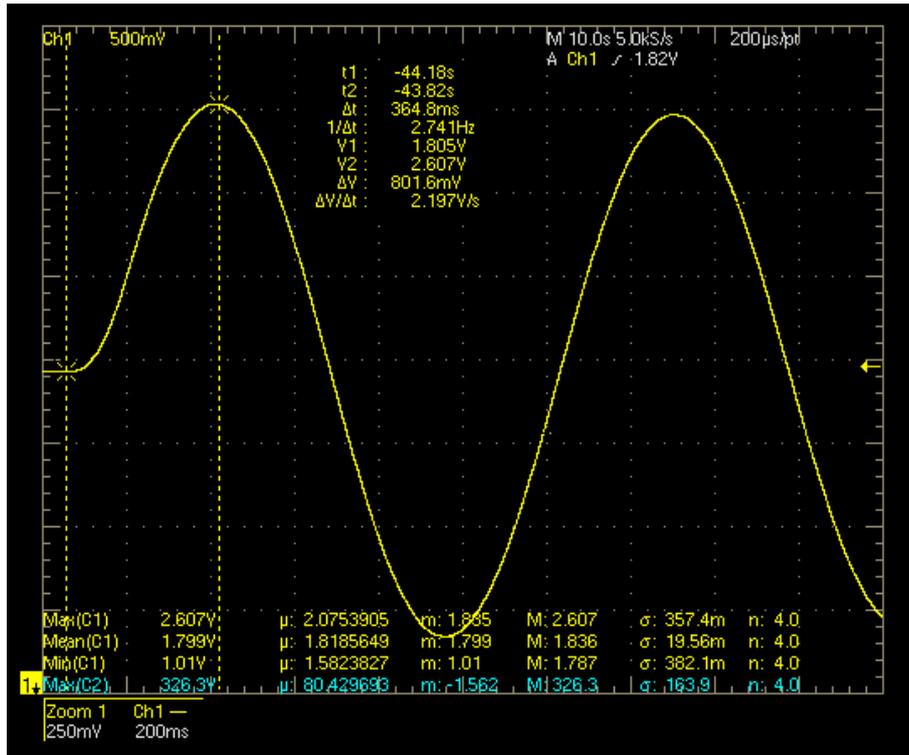
Figura 4.39 - Tensão de saída do sensor (canal #1, em amarelo) e a tensão aplicada ao DCE durante o tempo Δt (canal #2, em azul) para J_b'' .



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.40 observa-se o mesmo ensaio anterior com a tensão de saída do sensor em detalhe, valores U_1 ($U_{médico}$) e U_2 ($U_{máximo}$) medidos.

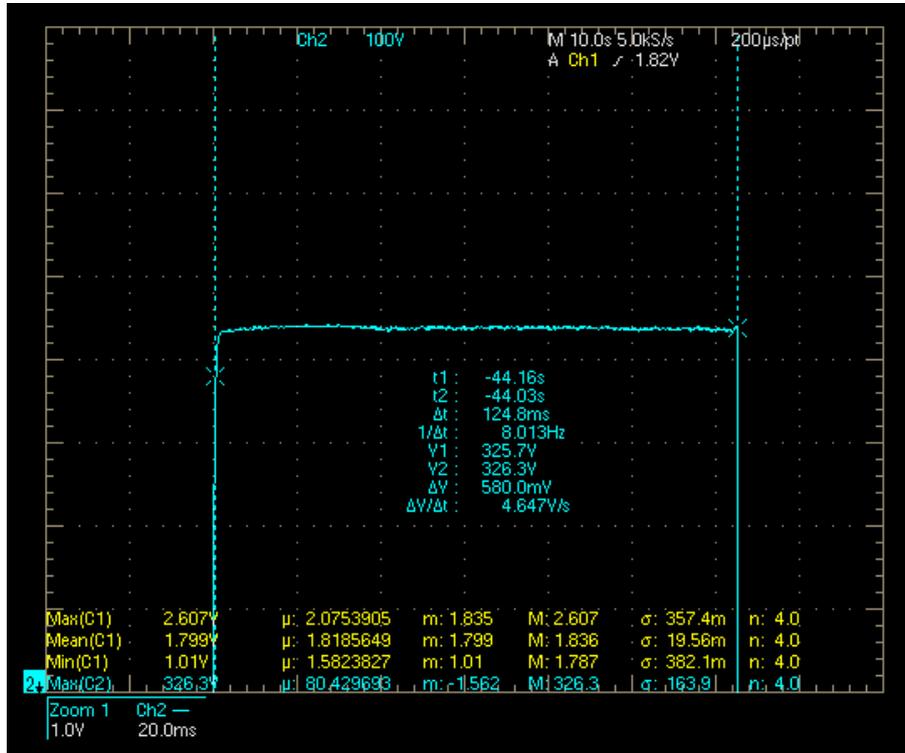
Figura 4.40 - Valores médio e máximo de tensão da saída do sensor óptico em detalhe (para o cálculo de Δx_{max}), com J_b'' .



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.41 mostra a tensão aplicada ao DCE (em detalhe), produzindo uma força (F_E) durante o tempo Δt e gerando o impulso para J_b''

Figura 4.41 - Tensão aplicada ao DCE (em detalhe), que produz uma força (F_E) durante o tempo Δt , gerando o impulso para J_b'' .

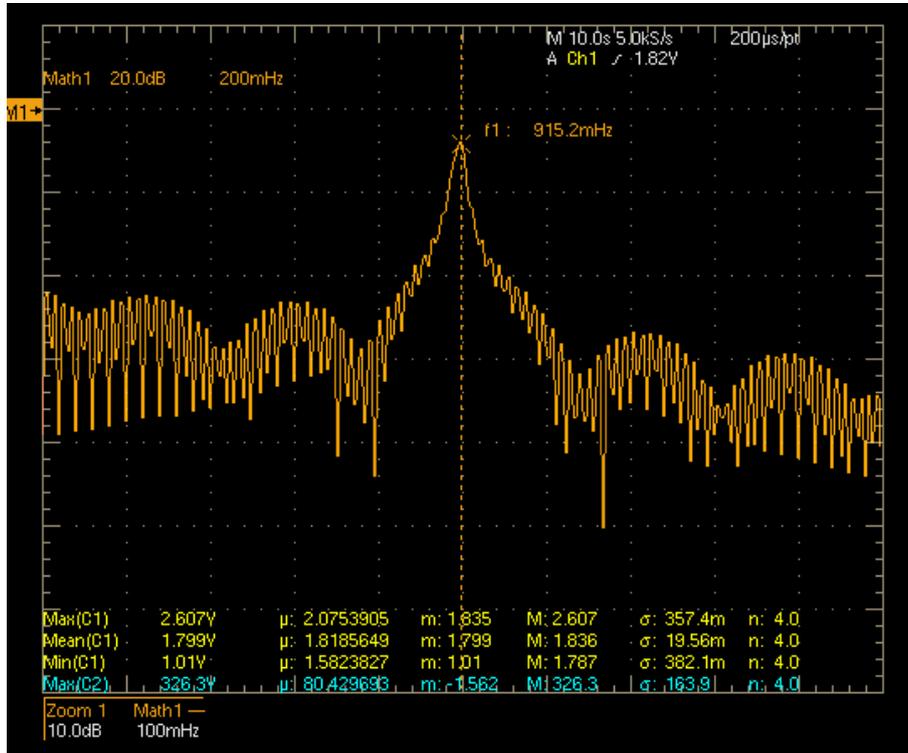


Fonte: Produção do autor.

A *FFT* do sinal de tensão do sensor óptico, para a balança com J_b'' , pode ser vista na Figura 4.42.

No DCE foram gerados diversos impulsos, através da aplicação de diferentes valores de tensão (e tempos de duração) sobre seus eletrodos. Todos os cálculos dos parâmetros necessários para a medição do impulso pela balança (J , f_{nat} , Δx_{max} , r_T e r_{sens}), foram realizados como descrito no item 3.

Figura 4.42 - *FFT* do sinal de tensão do sensor óptico (medido pelo osciloscópio digital) para J''_b .



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.22 são apresentados os impulsos produzidos pelo DCE e os calculados com os parâmetros medidos pela balança de empuxo. Os pontos 1, 3, 5, 7 e 8 correspondem às massas dos pesos-padrão combinadas utilizadas, listadas na Tabela 4.8.

A frequência de oscilação da balança com a nova configuração (J''_b), para cada ponto (1, 3, 5, 7 e 8) da Tabela 4.22, comparada aos mesmos pontos da Tabela 4.16 (mesmos pesos-padrão utilizados), aumentou. Isso era esperado devido à redução do novo momento de inércia ($J''_b < J'_b$).

A Tabela 4.23 mostra os impulsos máximos, obtidos com as massas equivalentes de *PPT* e com os novos momentos de inércia. Os valores do $I_{bit_{max}}$ foram conseguidos através do cálculo do coeficiente angular das equações lineares, referentes aos gráficos com os valores de impulso (I_{bit}), no eixo das ordenadas e o deslocamento linear do braço da balança de empuxo (Δx), no eixo das abscissas, para os pontos 1, 3, 5, 7 e 8 da Tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Comparação entre os impulsos aplicados pelo DCE e os medidos pela balança de empuxo com $r_T = r_{sens} = 0,2460 \pm 0,0005$ m e J_b'' .

Força eletrostática produzida pelo DCE (μN)	Tempo de aplicação da força eletrostática Δt (ms)	Impulso produzido pelo DCE ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)	Impulso medido pela balança ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)	Erro relativo (%)	Momento de inércia total J ($\times 10^{-3}$) ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	Frequência natural f_{nat} (mHz)	Deslocamento máximo Δx_{max} (μm)	
$314,10 \pm 0,29$	$122,0 \pm 0,2$	$38,32 \pm 0,07$	$39,4 \pm 3,9$	$2,90 \pm 0,10$	$42,09 \pm 2,44$	$917,0 \pm 9,5$	$9,76 \pm 0,76$	Ponto 1
$295,89 \pm 0,28$	$124,8 \pm 0,2$	$36,93 \pm 0,07$	$38,3 \pm 3,8$	$3,73 \pm 0,10$	$42,09 \pm 2,44$	$915,2 \pm 9,5$	$9,50 \pm 0,76$	
$244,54 \pm 0,23$	$140,8 \pm 0,2$	$34,43 \pm 0,06$	$35,3 \pm 3,7$	$2,57 \pm 0,10$	$42,09 \pm 2,44$	$918,2 \pm 9,5$	$8,73 \pm 0,75$	
$108,68 \pm 0,11$	$135,2 \pm 0,2$	$14,69 \pm 0,03$	$15,4 \pm 2,9$	$4,77 \pm 0,19$	$42,09 \pm 2,44$	$919,0 \pm 9,5$	$3,80 \pm 0,69$	
$332,84 \pm 0,31$	$141,2 \pm 0,2$	$47,00 \pm 0,08$	$48,6 \pm 4,2$	$3,40 \pm 0,09$	$54,19 \pm 2,64$	$805,4 \pm 9,5$	$10,64 \pm 0,77$	Ponto 3
$278,23 \pm 0,26$	$149,6 \pm 0,2$	$41,62 \pm 0,07$	$43,2 \pm 4,0$	$3,77 \pm 0,09$	$54,19 \pm 2,64$	$808,6 \pm 9,5$	$9,42 \pm 0,76$	
$131,51 \pm 0,13$	$168,4 \pm 0,2$	$22,15 \pm 0,03$	$23,0 \pm 3,5$	$3,81 \pm 0,15$	$54,19 \pm 2,64$	$810,8 \pm 9,5$	$5,00 \pm 0,71$	
$352,14 \pm 0,33$	$148,0 \pm 0,2$	$52,12 \pm 0,09$	$53,6 \pm 4,4$	$2,79 \pm 0,08$	$66,30 \pm 2,84$	$730,6 \pm 9,5$	$10,57 \pm 0,77$	Ponto 5
$342,42 \pm 0,32$	$132,0 \pm 0,2$	$45,20 \pm 0,08$	$47,1 \pm 4,3$	$4,22 \pm 0,09$	$66,30 \pm 2,84$	$731,0 \pm 9,5$	$9,29 \pm 0,76$	
$295,89 \pm 0,28$	$132,4 \pm 0,2$	$39,18 \pm 0,07$	$41,3 \pm 4,1$	$5,51 \pm 0,10$	$66,30 \pm 2,84$	$730,9 \pm 9,5$	$8,15 \pm 0,74$	
$479,30 \pm 0,43$	$131,2 \pm 0,2$	$62,88 \pm 0,11$	$69,1 \pm 5,3$	$9,84 \pm 0,08$	$102,61 \pm 3,44$	$587,6 \pm 9,5$	$10,94 \pm 0,77$	Ponto 7
$456,74 \pm 0,42$	$112,8 \pm 0,2$	$51,52 \pm 0,10$	$56,9 \pm 5,1$	$10,35 \pm 0,09$	$102,61 \pm 3,44$	$588,0 \pm 9,5$	$9,00 \pm 0,77$	
$434,74 \pm 0,40$	$112,0 \pm 0,2$	$48,69 \pm 0,10$	$53,7 \pm 5,0$	$10,23 \pm 0,09$	$102,61 \pm 3,44$	$587,6 \pm 9,5$	$8,50 \pm 0,75$	
$244,54 \pm 0,23$	$106,4 \pm 0,2$	$26,02 \pm 0,05$	$28,7 \pm 4,6$	$10,26 \pm 0,16$	$102,61 \pm 3,44$	$588,8 \pm 9,5$	$4,54 \pm 0,72$	
$626,02 \pm 0,56$	$123,0 \pm 0,2$	$77,00 \pm 0,14$	$78,7 \pm 6,5$	$2,21 \pm 0,08$	$163,12 \pm 4,44$	$464,9 \pm 9,5$	$9,91 \pm 0,78$	Ponto 8
$550,21 \pm 0,49$	$131,6 \pm 0,2$	$72,41 \pm 0,13$	$68,9 \pm 6,3$	$4,89 \pm 0,09$	$163,12 \pm 4,44$	$465,2 \pm 9,5$	$8,67 \pm 0,76$	
$526,03 \pm 0,47$	$123,6 \pm 0,2$	$65,02 \pm 0,12$	$63,8 \pm 6,2$	$1,87 \pm 0,10$	$163,12 \pm 4,44$	$465,3 \pm 9,5$	$8,03 \pm 0,76$	
$502,39 \pm 0,45$	$123,2 \pm 0,2$	$61,89 \pm 0,12$	$62,9 \pm 6,2$	$1,67 \pm 0,10$	$163,12 \pm 4,44$	$465,1 \pm 9,5$	$7,92 \pm 0,76$	

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.23 - Momento de inércia (J), sua equivalência à massa do PPT (m_{PPT}) e o impulso máximo medido ($I_{bit_{max}}$) para J_b'' .

Ponto	J ($\times 10^{-3}$) ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	m_{PPT} (g)	$I_{bit_{max}}$ ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)
1	$42,09 \pm 2,44$	$111,0490 \pm 0,0004$	$40,30 \pm 3,06$
3	$54,19 \pm 2,64$	$211,0491 \pm 0,0006$	$45,50 \pm 3,52$
5	$66,30 \pm 2,84$	$311,0492 \pm 0,0007$	$50,58 \pm 3,90$
7	$102,61 \pm 3,44$	$611,049 \pm 0,002$	$63,12 \pm 4,80$
8	$163,12 \pm 4,44$	$1111,049 \pm 0,004$	$79,25 \pm 6,11$

Fonte: Produção do autor.

Os coeficientes angulares obtidos para J_b'' , que permitem o cálculo do impulso máximo (para $\Delta x = 10 \mu\text{m}$), estão listados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 - Coeficiente angular (a) e o impulso máximo ($I_{bit_{max}}$) calculados para $\Delta x = 10 \mu\text{m}$ com J_b'' .

Ponto	a (kg/s)	$I_{bit_{max}}$ ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)
1	$4,03 \pm 0,65$	$40,30 \pm 3,06$
3	$4,55 \pm 0,89$	$45,50 \pm 3,52$
5	$5,06 \pm 2,49$	$50,58 \pm 3,90$
7	$6,31 \pm 1,38$	$63,12 \pm 4,80$
8	$7,92 \pm 4,04$	$79,25 \pm 6,11$

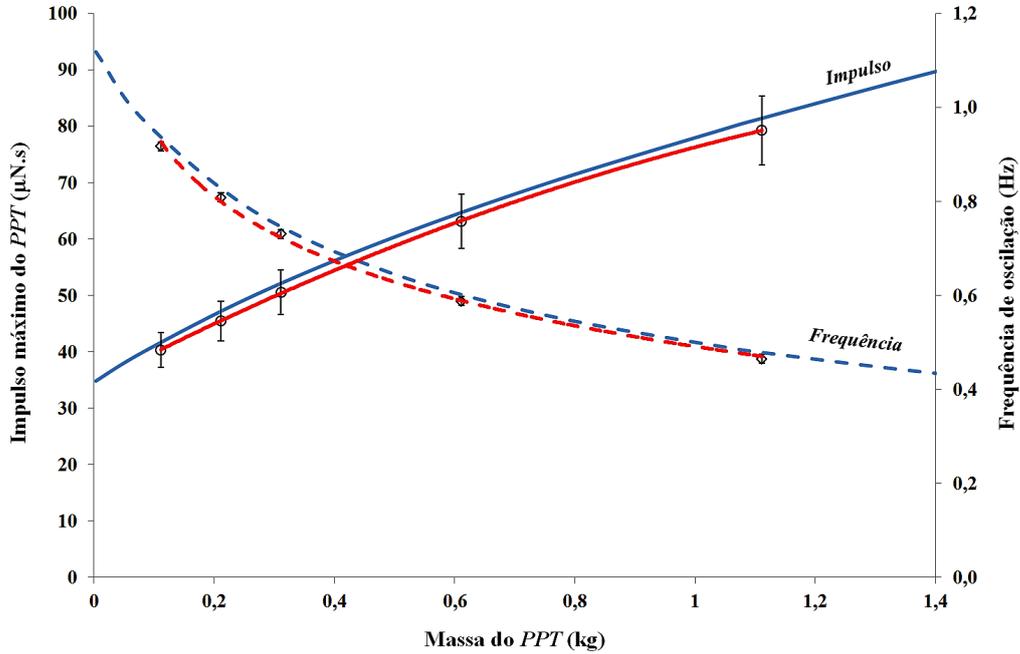
Fonte: Produção do autor.

Comparando-se a Tabela 4.23 com a Tabela 4.17 percebe-se um pequeno aumento do impulso máximo medido pela balança, para o segundo caso, $I_{bit_{max}}$ passou de $72,23 \pm 5,58$ para $79,25 \pm 6,11 \mu\text{N}\cdot\text{s}$. Isso ocorre porque diminuindo-se a distância do ponto de aplicação da força, para que o braço da balança sofra o mesmo deslocamento linear máximo de $10 \mu\text{m}$, é necessário se aplicar uma força maior (Equação 2.1), o que pode gerar conseqüentemente um impulso maior. Por outro lado, a redução do momento de inércia ($J_b'' < J_b'$) reduz a força (Equação 1.7), que aplicada por um mesmo período de tempo reduziria o impulso.

Neste caso, o ideal seria reduzir a distância de aplicação da força em relação ao eixo de rotação e aumentar o momento de inércia do braço da balança, permitindo-se assim, que um impulso maior possa ser aplicado pelo DCE. Limites devem ser respeitados pois, ao se aumentar o momento de inércia da balança a frequência de oscilação diminui ao quadrado, o que faz com que o sinal de frequência seja mais difícil de ser medido com um osciloscópio digital e poderia exigir o uso de sistemas de aquisição de dados.

Com os novos valores de impulsos máximos e das massas dos $PPTs$ da Tabela 4.23 fez-se um gráfico do $I_{bit_{max}}$ no eixo das ordenadas e m_{PPT} no eixo das abscissas. Esse gráfico experimental (linha contínua em vermelho) foi comparado com o teórico (linha contínua em azul), obtido pela Equação 2.5 e visto na Figura 2.6. No eixo secundário vertical (à direita) estão os valores das frequências teórica (tracejado em azul) e experimental (tracejado em vermelho). Os valores das frequências teóricas foram obtidos pela Equação 2.6.

Figura 4.43 - Impulso máximo teórico e experimental possível de ser medido pela balança de empuxo (com J_b'') em função da massa do PPT e a frequência de oscilação da balança.



Equação do impulso máximo experimental (—) em vermelho: $-13,776(m_{PPT})^2 + 55,668(m_{PPT}) + 34,381$ ($R^2 = 0,9999$); equação da frequência experimental (- - -) em vermelho: $-0,198 \ln(m_{PPT}) + 0,4912$ ($R^2 = 0,998$); impulso máximo teórico (—) em azul e frequência teórica (- - -) em azul.

Fonte: Produção do autor.

As barras verticais na curva experimental da Figura 4.43 representam as incertezas dos valores dos impulsos máximos e as incertezas das massas dos PPTs não estão representadas por não serem visíveis, correspondendo à 0,00036 % (Tabela 4.17).

Tabela 4.25 - Valores dos coeficientes utilizados na Equação 2.5 para o gráfico da Figura 4.43.

Coeficiente	Descrição	Valor
r_F	Distância da força aplicada ao eixo de rotação.	0,2450 m
r_{sens}	Distância do sensor ao eixo de rotação.	0,245 m
Δx_{max}	Deslocamento máximo na região linear.	10 μm
J_C^1	Momento de inércia do conjunto.	$(29,3923 \pm 0,0004) \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
k	Constante elástica de torção dos 2 pivôs	1,4684 N·m/rad

Fonte: Produção do autor.

4.5 Resolução da balança de empuxo

A resolução da balança de empuxo é determinada pela resolução do sensor óptico (0,013 μm) multiplicada pelo coeficiente angular (a), que foi obtido para a curva do impulso (I_{bit}) em função do deslocamento linear (Δx). A variação linear de 0,013 μm fará com que a tensão na saída do sensor óptico varie de $1,098 \pm 1\%$ V (Equação 4.10). Os valores da resolução são válidos para o deslocamento (Δx) dentro da região linear do sensor óptico (22,1 a 42,2 μm).

4.5.1 Resolução da balança para J'_b e κ

Nessa configuração, a balança de empuxo foi testada com 8 pesos-padrão diferentes, e foram determinados seus respectivos coeficientes angulares, a (Tabela 4.18). A Tabela 4.26 mostra a resolução da balança para cada coeficiente angular.

A resolução da balança de empuxo irá variar de 0,047 a 0,094 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$, na primeira configuração.

¹Calculado pelo software AutoDesk Inventor[®] Professional 2016 versão educacional.

Tabela 4.26 - Coeficientes angulares (a) e as resoluções para J'_b e κ .

Ponto	a (kg/s)	Resolução ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)
1	3,64 \pm 0,60	0,047
2	3,90 \pm 0,75	0,051
3	4,10 \pm 0,89	0,053
4	4,36 \pm 1,80	0,057
5	4,57 \pm 1,60	0,059
6	4,77 \pm 0,76	0,062
7	5,73 \pm 1,86	0,075
8	7,22 \pm 1,49	0,094

Fonte: Produção do autor.

4.5.2 Resolução da balança para J''_b e κ'

Nessa nova configuração, a balança de empuxo foi testada com 5 pesos-padrão diferentes, que correspondem as coeficientes angulares (pontos 1, 3, 5, 7 e 8) da Tabela 4.24. A Tabela 4.27 mostra a resolução da balança para cada coeficiente angular.

Tabela 4.27 - Coeficientes angulares (a) e as resoluções para J''_b e κ' .

Ponto	a (kg/s)	Resolução ($\mu\text{N}\cdot\text{s}$)
1	3,64 \pm 0,60	0,052
3	4,10 \pm 0,89	0,059
5	4,57 \pm 1,60	0,066
7	5,73 \pm 1,86	0,082
8	7,22 \pm 1,49	0,103

Fonte: Produção do autor.

A resolução da balança de empuxo irá variar de 0,052 a 0,103 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$, na segunda configuração.

4.6 Calibração estática

A calibração estática foi realizada através do DCE que aplicou uma força constante ao braço da balança de empuxo até que a reação entre a força de restauração do pivô de torção e a força do DCE, que puxava o braço da balança, entrasse em equilíbrio e a balança não oscilasse. A força aplicada pelo DCE é determinada pela distância de

separação dos eletrodos (D_E) e obtida pela sua respectiva curva de calibração linearizada. No entanto, na calibração estática a força aplicada faz com o que o braço da balança se desloque e mude a distância entre os eletrodos, mudando também a força eletrostática. No equilíbrio, a força final será maior do que a inicial (Equação 1.35), pois $D_{Efinal} < D_{Einicial}$, e deverá ser corrigida com uma nova calibração linearizada.

O micrômetro utilizado não permitiu a obtenção da curva de calibração do DCE com $D_E < 10 \mu\text{m}$. As curvas de calibração foram obtidas para $D_E = 1,00 \pm 0,01 \text{ mm}$ e $D_E = 0,99 \pm 0,01 \text{ mm}$. Portanto, quando o deslocamento do braço da balança, Δx (e portanto, do eletrodo) foi inferior à $5 \mu\text{m}$, utilizou-se a curva de calibração linearizada com $D_E = 1,00 \pm 0,01 \text{ mm}$ para a determinação da força. Quando o deslocamento foi igual ou maior que $5 \mu\text{m}$, a força considerada foi a obtida pela curva de calibração com $D_E = 0,99 \pm 0,01 \text{ mm}$.

As distâncias (em μm) entre o braço da balança e o sensor óptico foram determinadas através da curva da calibração do sensor (Figura 3.2) medindo-se as tensões inicial U_1 e final U_2 do sensor. A Tabela 4.28 mostra os resultados obtidos para a calibração estática da balança de empuxo com $J'_b = (46,98 \pm 1,55) \times 10^{-3} \text{ (kg}\cdot\text{m}^2)$ para uma massa equivalente de *PPT* de $111,0490 \pm 0,0004 \text{ g}$. A incerteza da tensão da fonte digital (δU_E) não foram apresentadas na Tabela 4.28 por conveniência, sendo $\delta U_E = \pm 2,5 \text{ mV}$.

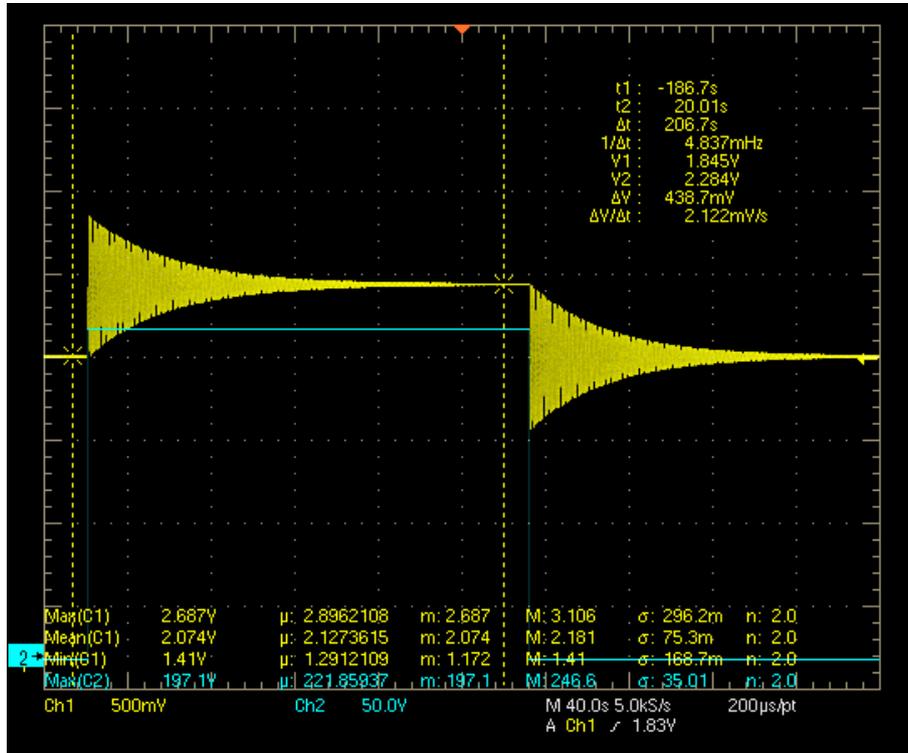
Tabela 4.28 - Resultados da calibração estática obtida para J'_b e $m_{PPT} = 111,0490 \pm 0,0004 \text{ g}$.

Tensão da fonte (V)	Força eletrostática do DCE (μN)	Tensão inicial do sensor (V)	Tensão final do sensor (V)	Distância inicial entre o braço e o sensor (μm)	Distância final entre o braço e o sensor (μm)	Deslocamento máximo Δx_{max} (μm)
300	$249,87 \pm 0,20$	$1,846 \pm 0,001$	$2,802 \pm 0,001$	$32,43 \pm 0,12$	$43,75 \pm 0,12$	$11,32 \pm 0,24$
250	$173,52 \pm 0,14$	$1,846 \pm 0,001$	$2,521 \pm 0,001$	$32,43 \pm 0,12$	$40,43 \pm 0,12$	$8,00 \pm 0,24$
200	$111,05 \pm 0,09$	$1,845 \pm 0,001$	$2,284 \pm 0,001$	$32,42 \pm 0,12$	$37,62 \pm 0,12$	$5,20 \pm 0,24$
150	$61,13 \pm 0,05$	$1,846 \pm 0,001$	$2,097 \pm 0,001$	$32,43 \pm 0,12$	$35,40 \pm 0,12$	$2,97 \pm 0,24$
100	$27,17 \pm 0,02$	$1,845 \pm 0,001$	$1,961 \pm 0,001$	$32,42 \pm 0,12$	$33,79 \pm 0,12$	$1,37 \pm 0,24$

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.44 mostra a medição da tensão na saída do sensor óptico (canal #1 do osciloscópio digital, em amarelo) e da tensão aplicada ao DCE (canal #2, em azul) para um ensaio da calibração estática da balança.

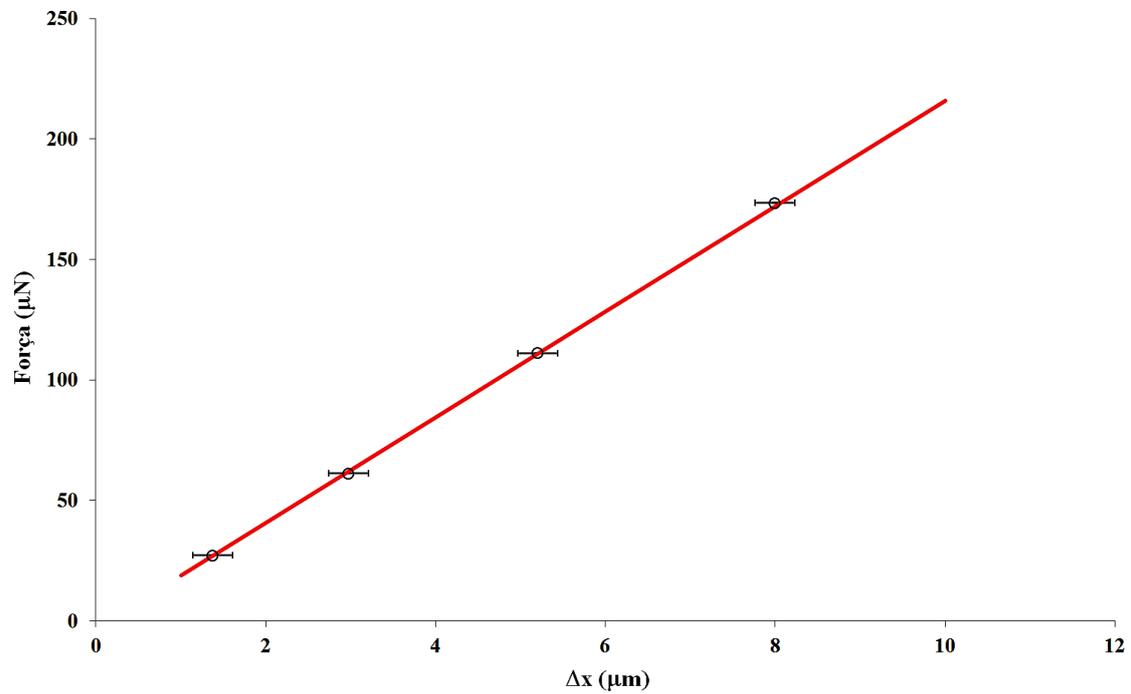
Figura 4.44 - Tensão na saída do sensor óptico (canal #1, em amarelo) e tensão aplicada ao DCE (canal #2, em azul), para J'_b e $m_{PPT} = 111,0490 \pm 0,0004$ g.



Fonte: Produção do autor.

A curva de calibração estática da balança de empuxo com $J'_b = (46,98 \pm 1,55) \times 10^{-3}$ (kg·m²), para uma massa equivalente de PPT de $111,0490 \pm 0,0004$ g, é mostrada na Figura 4.45. As barras horizontais representam as incertezas dos valores do deslocamento linear (δx). As incertezas da força de empuxo não são mostradas por não serem visíveis (da ordem de décimos de μN , vistas na Tabela 4.28). Os coeficientes angular, a , e linear, b , da Figura 4.45, foram obtidos pelas Equações 3.12 e 3.13, respectivamente e suas incertezas, δa e δb , pelas Equações 3.15 e 3.16, respectivamente.

Figura 4.45 - Força de empuxo em função do deslocamento linear do braço da balança, para J'_b e $m_{PPT} = 111,0490 \pm 0,0004$ g.



Coefficiente angular: $21,872 \pm 0,015 \mu\text{N}/\mu\text{m}$ e coeficiente linear: $-2,902 \pm 0,033 \mu\text{N}$

Fonte: Produção do autor.

5 CONCLUSÃO

Desenvolveu-se uma balança de empuxo capaz de medir impulsos na faixa de 14 a $79 \mu\text{N}\cdot\text{s}$, com resolução mínima de 0,05 e máxima de $0,10 \mu\text{N}\cdot\text{s}$, necessária para a caracterização inequívoca de propulsores elétricos, como o propulsor de plasma pulsado. Para uma massa equivalente de *PPT* com $\approx 111 \text{ g}$, a faixa de empuxo da calibração estática da balança (para J'_b) foi de 27 a $280 \mu\text{N}$. A técnica de medição de empuxo direta, na qual o sistema propulsivo é montado sobre a própria balança de empuxo, foi escolhida por mostrar-se mais adequada para a medição de forças de poucos μN . Dentre as configurações mais comuns de pêndulos para balanças de empuxo encontrados na literatura, segundo a topologia estrutural do sistema de medição, a que mais se mostrou vantajosa foi a configuração de pêndulo de torção.

A balança de empuxo foi projetada considerando-se parâmetros dimensionais para a faixa de impulso de *PPTs*. Juntamente com as dimensões da balança foi determinada a constante elástica dos dois pivôs de torção, responsáveis pela sua característica elástica, que permite a oscilação do braço com uma determinada frequência (inversamente proporcional ao momento de inércia da balança) e sua lenta restauração à posição inicial devido ao seu baixo coeficiente de atrito. Um sensor de deslocamento (sensor óptico) foi escolhido para medir o deslocamento linear do braço da balança dentro de uma faixa linear de operação de $10 \mu\text{m}$.

O DCE foi utilizado como calibrador e como simulador de um propulsor, permitindo a aplicação de um impulso variável ao braço da balança. Esse impulso foi utilizado como referência para verificar o impulso medido pela balança e também para realizar sua calibração estática. Uma base com micrômetro foi usada para o ajuste da distância entre os eletrodos do DCE para sua calibração.

Comparando-se as forças obtidas pelas curvas de calibração do DCE teórica e experimental, para as duas distâncias D_E consideradas, verificou-se um erro relativo percentual de $\approx 22 \%$. Essa diferença encontrada se deve principalmente ao erro na medição das distâncias entre os eletrodos do DCE, que foi realizada com um micrômetro montado em uma base deslizante não muito adequada e que não permitiu um ajuste mais preciso e um erro relativo percentual menor.

Na calibração estática há uma redução da distância entre os eletrodos (D_E pode ir de $1,00 \pm 0,01 \text{ mm}$ para $0,99 \pm 0,01 \text{ mm}$) devido ao deslocamento do braço da balança que faz com que a força final aplicada pelo DCE deva sofrer um aumento de $\approx 2 \%$. Essa variação percentual da força ($\approx 2 \%$) foi observada tanto para as

curvas teóricas quanto para as experimentais.

Através da medição das frequências de oscilação do braço da balança de empuxo (FFT da tensão de saída do sensor óptico), que é inversamente proporcional ao momento de inércia do conjunto (formado pelo braço da balança, suportes e eletrodos do DCE), e do cálculo dos momentos de inércia dos respectivos pesos-padrão utilizados sobre a balança, foi possível obter experimentalmente os valores do momento de inércia do braço da balança (J'_b) e da constante elástica de torção do conjunto (κ). Para isso duas configurações foram testadas.

Na primeira configuração testada, os eletrodos e os pesos-padrão foram colocados à uma distância do eixo de rotação do braço da balança que gerou um momento de inércia J'_b experimental com um erro relativo percentual de $1,62 \pm 0,05 \%$, maior do que na segunda configuração, onde se diminui o momento de inércia do conjunto (os eletrodos e os pesos-padrão foram colocados mais próximos do eixo de rotação) e o erro relativo percentual de J''_b experimental foi de apenas $0,126 \pm 0,05 \%$. Para as constantes elásticas de torção (κ), na primeira configuração o erro foi de $2,96 \pm 0,08 \%$, menor do que na segunda configuração que foi de $4,794 \pm 0,199 \%$. Observando-se as curvas da Figura 4.27 nota-se que embora os valores de κ sejam iguais na teoria, experimentalmente a curva na segunda configuração ficou um pouco menos inclinada em relação ao eixo da abscissas (já esperado devido à diminuição do momento de inércia, pois $J''_b < J'_b$) mas cruzando o eixo das ordenadas um pouco abaixo de onde havia cruzado na primeira configuração. Isso afastou ainda mais κ' do seu valor teórico, aumentando o erro. No entanto, em ambas as configurações κ e κ' tiveram seus valores experimentais medidos dentro da faixa teórica fornecida pelo fabricante ($\delta\kappa = \pm 10 \%$). Para os valores do momento de inércia, na primeira configuração a curva experimental ficou menos paralela em relação à teórica do que na segunda configuração, onde pode-se observar uma melhor condição de paralelismo entre as curvas teórica e experimental e portanto, um erro relativo também menor de J''_b . Estes erros são devidos principalmente às diferenças no posicionamento dos eletrodos e dos pesos-padrão sobre os suportes, quando comparados aos valores teóricos.

As diferenças entre as medidas projetadas e as peças fabricadas, os erros durante a montagem (dificuldades na fixação de algumas partes), o desalinhamento dos pivôs de torção no braço da balança (verticalmente e horizontalmente), a precisão do posicionamento dos pesos-padrão sobre os suportes em relação ao eixo de rotação da balança, as diferenças de massas entre os eletrodos do DCE (que causa desalinha-

mento do braço da balança), as bases lineares (com parafuso e micrômetro) não adequadas, além dos ruídos externos (que embora pequenos são capazes de influenciar na medição devido à grande sensibilidade da balança), dentre outros motivos, contribuíram para aumento do erro encontrado na medição do impulso.

As massas dos *PPTs* citadas neste trabalho (de ≈ 111 g a 1111 g) foram obtidas pela soma das massas dos eletrodos do DCE com as massas dos pesos-padrão. Dessa forma, embora não se tivesse testado um *PPT*, foi possível simular as massas dos mesmos e verificar o menor e o maior impulso que poderia ser medido nas duas configurações da balança de empuxo. O impulso gerado (considerado no centro geométrico do peso-padrão, “*PPT*”), foi aplicado pelo eletrodo (disco) com seu centro alinhado ao centro do peso-padrão.

Na primeira configuração (J'_b e κ maiores) o impulso aplicado pelo DCE foi medido pela balança de empuxo para oito *PPTs* de massas diferentes, e apresentou valores de 13,5 a 72,2 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ com erro máximo de ≈ 9 %. Essa configuração permitiu obter-se maior sensibilidade (resolução mínima de 0,047 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$), o que pode ser bom para propulsores com empuxos ainda menores, tais como propulsores em microchips.

Já na segunda configuração (J''_b e κ' menores) o impulso aplicado pelo DCE foi medido pela balança de empuxo para cinco *PPTs* de massas diferentes, e apresentou valores de 15,4 a 79,3 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ com erro máximo de ≈ 10 %. Portanto, diminuindo-se a distância do local de aplicação da força que causa o impulso, em relação ao eixo de rotação da balança, aumenta-se o valor do impulso que poderá ser medido pela balança para um *PPT* de mesma massa. Essa nova configuração permite obter-se menor sensibilidade (resolução máxima de 0,103 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$), o que permite o testes de propulsores com empuxos maiores.

Esse efeito no aumento da capacidade de medição do impulso ocorre porque ao se diminuir a distância do local de aplicação da força ela deverá ser maior, para que o braço da balança tenha o mesmo deslocamento linear máximo, o que vai permitir medir um impulso maior. Mas por outro lado, a redução do momento de inércia do braço da balança ($J''_b < J'_b$) reduz a força, o que reduz a medição do impulso. Dessa forma, para um aumento mais efetivo do impulso que pode ser medido pela balança, mantendo-se sua característica elástica (mesmos pivôs de torção) e o mesmo sensor (mesma faixa linear de medição de deslocamento), o ideal é que ao se diminuir a distância do local de aplicação da força em relação ao eixo de rotação, a redução do momento de inércia total (devido à redução da distância entre o *PPT* e o eixo da balança) seja compensada com pesos-padrão mais distantes em relação ao eixo.

O impulso máximo que pode ser medido pela balança de empuxo (com J'_b e J''_b) é função da massa do *PPT* a ser testado. Essa massa irá influenciar, além do impulso, o momento de inércia total da balança e também sua frequência de oscilação e seu amortecimento. Os limites observados para a medição do impulso são a massa do *PPT* e o momento de inércia do conjunto, que é inversamente proporcional à frequência de oscilação. Quanto menor for a massa do *PPT* em teste, menor será o valor do impulso máximo para medição, pois o limite superior da região linear do sensor óptico será mais facilmente atingido. Quanto maior for a massa do *PPT*, maior será o valor do impulso que poderá ser medido, mas isso reduzirá o valor da frequência de oscilação da balança, o que dificulta sua medição (*FFT* do sinal do sensor), a não ser que sejam utilizados sistemas de aquisição de dados.

A balança de empuxo na configuração de pêndulo de torção, utilizada neste trabalho, mostrou-se efetiva na medição do impulso de poucos $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ para micropropulsores (*PPTs*) e, embora durante os testes realizados não tenha sido possível atingir o valor máximo da faixa de impulso pretendida (20 a 150 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$), pode-se modificar as características da balança de empuxo, adaptando-a para outros valores de massa de *PPT* e também de impulso, através da variação da constante elástica dos seus pivôs de torção, da região linear do sensor de deslocamento e da variação do momento de inércia do braço da balança. O erro máximo do impulso medido durante os testes foi de 10 %. Embora tenha ficado abaixo dos valores de erro típicos para esse tipo de balança (de 12 a 15 %) os testes foram realizados com o menor ruído externo possível, pois foram feitos com as bombas de vácuo desligadas.

6 TRABALHOS FUTUROS

Os testes iniciais com a balança de empuxo não puderam ser realizados com *PPTs* e um dos principais objetivos de trabalhos futuros é a realização destes testes. Para isto, pretende-se montar o *PPT* de dupla descarga disponível no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE na câmara de vácuo adquirida e realizar as medidas de impulso total (eletromagnético e gás dinâmico) deste propulsor.

A balança de empuxo deverá sofrer melhorias tais como uma construção mais precisa de cada peça da balança, o que facilitará sua montagem final; uma demarcação milimétrica do braço da balança, o que permitirá uma leitura mais precisa da distância entre o *PPT* e seu contra-peso em relação ao eixo de rotação; uma base deslizante específica para o vácuo com parafuso micrométrico digital, que possa posicionar os eletrodos e o sensor de deslocamento com maior precisão e boa repetibilidade (ou ainda um motor de passo para posicionamento micrométrico do sensor com a câmara em vácuo); pivôs de torção intercambiáveis com diferentes valores de constante elástica para uma melhor adequação da balança à faixa de impulso que deverá ser medida; sensores de deslocamento com diferentes faixas lineares de medição; suportes para o *PPT* e o contra-peso que possam ser posicionados com precisão (pela demarcação milimétrica do braço da balança) ao longo de todo o braço, permitindo uma maior variação da faixa de impulso a ser medida; pesos-padrão com valores de massa diversos na faixa típica das massas dos *PPTs*; um sistema para parar a oscilação do braço da balança e deixá-lo na sua posição inicial de repouso (a fim de se reduzir drasticamente o tempo de ajuste da balança e o tempo entre os ensaios).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). **Satélites de Coletas de Dados**. 2012a. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/resumo-satelites/>>. Acesso em: 27 setembro 2016. 3

_____. **Satélites Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS)**. 2012b. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/satelites-sino-brasileiro-de-recursos-terrestres-cbers/>>. Acesso em: 27 setembro 2016. 3

_____. **Programa Espacial**. 2012c. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/programa-espacial/linha-do-tempo/>>. Acesso em: 27 setembro 2016. 3

_____. **Satélite Amazônia-1**. 2012d. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/satelite-amazonia-1/>>. Acesso em: 27 setembro 2016. 4

_____. **Plataforma Multimissão (PMM)**. 2012e. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/plataforma-multimissao-pmm/>>. Acesso em: 28 setembro 2016. 4

_____. **Satélite Científico LATTES**. 2012f. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/satelite-cientifico-lattes/>>. Acesso em: 28 setembro 2016. 4

_____. **Satélite GPM - Brasil**. 2012g. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/satelite-gpm-brasil/>>. Acesso em: 28 setembro 2016. 4

_____. _____. 2015a. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/cubsat-brasileiro-lancado-com-sucesso-da-estacao-espacial-internacional/>>. Acesso em: 29 setembro 2016. 7

_____. **Nanossatélite Serpens**. 2015b. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/nanossatelite-serpens-esta-em-orbita-e-tem-sinais-captados-no-brasil/>>. Acesso em: 29 setembro 2016. 7

AKIMOV, V.; NAGEL, I.; OGLOBLINA, I.; ANTROPOV, N.; POKRYSHKIN, A.; POPOV, G.; RUDIKOV, A. Analysis of ppt potentialities in solving the satellite orbit control tasks. In: INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE (IEPC), 25., 1997, Cleveland, Ohio. **Proceedings...** [S.l.]: ERPS, 1997. p. 906–910. [14](#)

BIJSTER, R. J. F. **Design, verification and validation of a micropropulsion thrust stand**. 277 p. Dissertação (AE5810 Master Thesis) — Department of Space Engineering - Faculty of Aerospace Engineering - Delft University of Technology, Faculteit Luchtvaart - Netherlands, 2014. Disponível em: <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:5c3f0eb3-511c-4443-90b2-46eed9a6b184/?collection=research>. Acesso em: 21 outubro 2016. [18](#), [19](#)

BURTON, R. L.; RYSANEK, F.; ANTONSEN, E. A.; WILSON, M. J.; BUSHMAN, S. S. Pulsed plasma thruster performance for microspacecraft propulsion. In: MICCI, M. M.; KETSDEVER, A. D. (Ed.). **Micropropulsion for Small Spacecraft**. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2000. v. 187, p. 339. Progress in Astronautics and Aeronautics. [11](#)

BURTON, R. L.; TURCHI, R. J. Pulsed plasma thruster. **Journal of Propulsion and Power**, v. 14, n. 5, 1998. September-October. [13](#), [18](#)

CASSADY, R. J.; HOSKINS, W. A.; CAMPBELL, M.; RAYBURN, C. A micro pulsed plasma thruster (ppt) for the “dawgstar” spacecraft. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2000, Big Sky, Montana. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2000. p. 7–13. [12](#)

CIARALLI, S.; COLETTI, M.; GABRIEL, S. B. An impulsive thrust balance for applications of micro-pulsed plasma thrusters. **Measurement Science and Technology**, v. 24, n. 11, p. 1–9, 2013. [16](#), [39](#), [46](#), [60](#), [62](#)

COSTA, F. S.; INTINI MARQUES, R. Propulsores de plasma pulsados: Configurações, histórico e estudo de variação de massa. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERINGS, 10., 2004, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** [S.l.]: ENCIT, 2004. p. 2. [9](#), [12](#), [13](#), [14](#), [17](#)

CUBESAT. **CubeSat Design Specification Rev.13**. 2015. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/>

56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf>. Acesso em: 3 abril 2017. 2, 3

EBERT, W. L.; KOWAL, S. J.; SLOAN, R. F. Operational nova spacecraft teflon pulsed plasma thruster system. In: JOINT PROPULSION CONFERENCE (JPC), 25., 1989, Monterey, California. **Proceedings...** [S.l.]: AIAA, 1989. p. 906–910. 14

ERENO, D. Pequenos ganham o espaço. **Revista Pesquisa FAPESP**, n. 219, p. 16–23, 2014. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2014/05/016-021_CAPA_nanosatelite_219-NOV01.pdf?78ec95>. Acesso em: 30 setembro 2016. 8

FIN, P. **Influência da geometria dos eletrodos secundários no desempenho de um propulsor de plasma pulsado de dois estágios**. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - S.P., 2014. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.10.16.00>>. Acesso em: 19 outubro 2016. 17

GAMERO-CASTAÑO, M. A torsional balance for the characterization of micronewton thrusters. **Review of Scientific Instruments**, v. 74, n. 10, p. 4509–4514, 2003. Disponível em: <http://mae.eng.uci.edu/Faculty/MGC/Articles/MGC_RevSciInstrum_03.pdf>. Acesso em: 20 outubro 2016. 18

GOEBEL, D. M.; KATZ, I. Thruster principles. In: **Fundamentals of electric propulsion: ion and hall thrusters**. Jet Propulsion laboratory, California Institute of Technology: JPL Space Science and Technology Series, 2008. Capítulo 2, p. 15–36. Disponível em: <http://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series1/Goebel__cmprsd_opt.pdf>. Acesso em: 14 outubro 2016. 16

GUMAN, W. J.; NATHANSON, D. Pulsed plasma microthruster propulsion system for synchronous orbit satellite. **Journal of Spacecraft**, v. 7, n. 4, 1970. April. 14

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 3 - Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro - R.J.: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1993. 4a Edição. 29, 30, 31, 47

HINCKEL, J. N. Propulsão de satélites. In: PRADO, A. F. B. A.; KUGA, H. K. (Ed.). **Fundamentos de tecnologia espacial**. São José dos Campos, S.P.: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. Capítulo 9, p. 127. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/43655142>>. Acesso em: 04 outubro 2016. 8

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Relatório de Estação Geodésica**. 2007. Disponível em: <<http://www.bdg.ibge.gov.br/bdg/pdf/relatorio.asp?L1=91727>>. Acesso em: 19 janeiro 2017. 73

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Guia para a expressão de incerteza de medição (ISO-GUM)**. 2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf>. Acesso em: 20 janeiro 2017. 67, 73

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Portal de Acesso à Informação**. 1999a. Disponível em: <<http://www.inpe.br/acessoainformacao/node/422>>. Acesso em: 26 setembro 2016. 1

_____. _____. 1999b. Disponível em: <<http://www.inpe.br/acessoainformacao/node/405>>. Acesso em: 26 setembro 2016. 1

_____. **Satélite de Coleta de Dados (SCD-1)**. 2003. Disponível em: <http://www.inpe.br/scd1/site_scd/fotos.htm>. Acesso em: 3 abril 2017. 4

_____. **Constelação de Nano Satélites Ambientais**. 2011a. Disponível em: <<http://www.crn2.inpe.br/conasat1/nanosatt.php>>. Acesso em: 27 setembro 2016. 2

_____. **Notícias**. 2011b. Disponível em: <<http://www.inpe.br/noticias/galeria.php>>. Acesso em: 4 abril 2017. 6

_____. **INPE - Notícias**. 2014a. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=3640>. Acesso em: 29 setembro 2016. 5

_____. **NanoSatC-BR1**. 2014b. Disponível em:

<<http://www.inpe.br/crs/nanosat/NanoSatCBR1.php>>. Acesso em: 29 setembro 2016. 6

_____. **Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres**. 2015. Disponível em:

<http://www.cbbers.inpe.br/sobre_satelite/historico.php>. Acesso em: 27 setembro 2016. 3, 5

INTINI MARQUES, R. **A mechanism to accelerate the late ablation in pulsed plasma thruster**. 192 p. Tese (PhD in Engineering Sciences) —

University of Southampton - Faculty of Engineering, Science Mathematics -

School of Engineering Sciences, Southampton - UK, 2009. Disponível em:

<<http://eprints.soton.ac.uk/67314/>>. Acesso em: 11 outubro 2016. 10, 11, 13, 16

JAHN, R. G. **Physics of Electric Propulsion**. New York: McGraw-Hill, 1964. 9,

10, 11

KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. **Keithley 6517A Electrometer User's**

Manual. 2016. Disponível em: <[http://www.tek.com/manual/](http://www.tek.com/manual/model-6517a-electrometer-users-manual-rev-d-manual)

[model-6517a-electrometer-users-manual-rev-d-manual](http://www.tek.com/manual/model-6517a-electrometer-users-manual-rev-d-manual)>. Acesso em: 16 dezembro 2016. 47, 68, 70, 75

KUGA, H. K. Técnicas de determinação de órbita de satélites artificiais. In:

PRADO, A. F. B. A.; KUGA, H. K. (Ed.). **Fundamentos de tecnologia**

espacial. São José dos Campos, S.P.: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. Capítulo 11, p. 138–139. Disponível em:

<<https://www.researchgate.net/publication/43655142>>. Acesso em: 04 outubro 2016. 8

LABORATÓRIO DE MATERIAIS (LAMAT). **Materiais Dielétricos**. 2015.

Disponível em: <[http:](http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap18.pdf)

[//www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap18.pdf](http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap18.pdf)>.

Acesso em: 29 janeiro 2017. 49, 78

MARIN, L. F. C. **Análise do desempenho de um propulsor a plasma pulsado de dupla descarga através da variação da distribuição de**

energia entre os seus dois estágios. 111 p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) — Instituto Nacional

de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - S.P., 2014. Disponível em:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HJUT9L>>. Acesso em: 18 outubro 2016. 17, 41

MARKUSIC, T.; JONES, J.; COX, M. Thrust stand for electric propulsion performance evaluation. In: JOINT PROPULSION CONFERENCE (JPC), 40., 2004, Fort Lauderdale, Florida. **Proceedings...** [S.l.]: AIAA, 2004. p. 1–10. 19, 20

MARS SPACE LTD. **Pulsed Plasma Thruster for CubeSat Propulsion**. 2014. Disponível em: <<http://www.mars-space.co.uk/Pages/PPTCUP.aspx>>. Acesso em: 05 outubro 2016. 15

MECKEL, N. J.; CASSADY, R. J.; OSBORNE, R. D.; HOSKINS, W. A.; MYERS, R. M. Investigation of pulsed plasma thrusters for spacecraft attitude control. In: INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE (IEPC), 25., 1997, Cleveland, Ohio. **Proceedings...** [S.l.]: ERPS, 1997. p. 813–820. 14

NASA GLENN RESEARCH CENTER. **Pulsed Plasma Thrusters**. 2004. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/centers/glenn/about/fs23grc.html>>. Acesso em: 26 outubro 2016. 12

NOTÍCIAS24. **Tecnologia**. 2015. Disponível em: <<http://www.noticias24.com/tecnologia/noticia/22581/dos-universidades-de-brasil-y-de-espana-pondran-en-orbita-un-nanosatelite/>>. Acesso em: 30 setembro 2016. 7

NÚCLEO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA MANTIQUEIRA (NIT). **NanosatC-BR1**. 2014. Disponível em: <<http://www.nitmantiqueira.org.br/portal/noticias/311-nanosatc-br1-completa-tres-meses-em-orbita>>. Acesso em: 30 setembro 2016. 6

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-Time Signal Processing**. New Jersey - U.S.A.: Prentice Hall, 1999. Second Edition. 62, 67

PALUMBO, D. J.; GUMAN, W. J. Continuing development of the short-pulsed ablative space propulsion system. **American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)**, n. 1154, 1972. November. 13, 14

PHILIP, J. **Experimental methods for engineers**. New York, NY 10020 - U.S.A.: McGraw-Hill, 2012. 8th Edition. 67

PHILTEC INC. **Fiberoptic Sensors - Distance - Displacement**. 2016.

Disponível em:

<<http://philterec.com/downloadssupport/documentlibrary/dspecs.html>>.

Acesso em: 07 dezembro 2016. 43, 44, 45, 63, 64, 84

PILCHOWSKI, H. U. Sensores e atuadores. In: PRADO, A. F. B. A.; KUGA, H. K. (Ed.). **Fundamentos de tecnologia espacial**. São José dos Campos, S.P.: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. Capítulo 4, p. 58.

Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/43655142>>.

Acesso em: 04 outubro 2016. 9

QSL.NET. **AESP-14**. 2014. Disponível em:

<<http://www.qsl.net/py4zbz/aesp.htm>>. Acesso em: 30 setembro 2016. 7

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Física**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984. Volume 2 - 309 p. 21, 22, 23, 24, 27, 57

RIVERHAWK. **Riverhawk Flexural pivot engineering data**. 2016. Disponível em:

<<http://flexpivots.com/cantilevered-single-ended-pivot-bearings/>>.

Acesso em: 21 novembro 2016. 36, 37, 38

SHIMADZU ANALYTICAL AND MEASURING INSTRUMENTS. **Shimadzu Analytical Balance Instruction Manual**. 2008. Disponível em: <<http://www.ssi.shimadzu.com/products/literature/balances/5iqj1d0000002onc.pdf>>.

Acesso em: 08 dezembro 2016. 48, 68, 69

SILVA, W. C. C. Movimento orbital. In: PRADO, A. F. B. A.; KUGA, H. K. (Ed.). **Fundamentos de tecnologia espacial**. São José dos Campos, S.P.: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. Capítulo 1, p. 15.

Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/43655142>>.

Acesso em: 04 outubro 2016. 8

SOCIEDADE PORTUGUESA DE QUÍMICA (SPQ). **Constantes Físicas Fundamentais**. 1990. Disponível em:

<<http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/563/article/3000454/pdf>>. Acesso em: 29 janeiro 2017. 49, 78

SOUZA, M. L. O. Sistemas de controle de atitude e de órbita. In: PRADO, A. F. B. A.; KUGA, H. K. (Ed.). **Fundamentos de tecnologia espacial**. São José dos Campos, S.P.: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. Capítulo

10, p. 133. Disponível em:

<<https://www.researchgate.net/publication/43655142>>. Acesso em: 04 outubro 2016. 8, 9

STARK, K. W.; DENNIS, T.; MCHNGH, D.; WILLIAMS, T. **Design and Development of a Micropound Extended Range Thrust Stand (MERTS)**. National Aeronautics and Space Administration Washington, D.C. 20546, 1971. NASA TN D-7029. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19710023920.pdf>>. Acesso em: 20 outubro 2016. 18

SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. **Rocket Propulsion Elements**. U.S.A.: John Wiley Sons, Inc., 2000. Seventh Edition. 11, 12

SYMON, K. R. **Mechanics**. Massachusetts - U.S.A.: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1960. Second Edition. 24, 25, 26, 57, 58

TAYLOR, J. R. **An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**. California - U.S.A.: University Science Books, 1997. Second Edition. 61, 63, 65, 67, 73, 76, 83, 110, 112, 114

TEKTRONIX INC. **TEKTRONIX TDS5000B Series Digital Phosphor Oscilloscopes Quick Start User Manual**. 2005. Disponível em: <<http://www.tek.com/oscilloscope/tds5054b-manual/tds5000b-series-quick-start-user-manual>>. Acesso em: 07 dezembro 2016. xvi, 44, 62, 63, 67, 68

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **Novas câmeras aumentarão alcance de imagens de satélite Amazonia-1**. 2016. Disponível em: <<http://www5.usp.br/104726/cameras-aumentam-alcance-de-imagens-de-satelite/>>. Acesso em: 4 abril 2017. 5

VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA. **Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados**. 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 19 janeiro 2017. 67, 73

VONDRA, R. The mit lincoln laboratory pulsed plasma thruster - a final report on the les-8/9 pulsed plasma thruster. In: INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE, 1976, Key Biscayne, Florida. **Proceedings...** [S.l.]: AIAA, 1976. p. 7-14. 14

VONDRA, R.; THOMASSEN, K. Flight qualified pulsed electric thruster for satellite control. **Journal of Spacecraft and Rockets**, v. 11, n. 9, p. 613–617, 1974. September. 14

VONDRA, R.; THOMASSEN, K.; SOLBES, A. Analysis of solid teflon pulsed plasma thruster. **Journal of Spacecraft**, v. 7, n. 12, p. 1402–1406, 1970. December. 13, 18

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.