



## Avanços no desenvolvimento de uma balança de impulso com aplicação em propulsão elétrica

SOARES, D. L. O.<sup>1</sup>, INTINI MARQUES, R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil  
Aluno de Mestrado do curso de Propulsão e Combustão - PCP

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LABCP), Cachoeira Paulista, SP, Brasil

oliveirasoaesd@gmail.com

---

**Resumo.** *O presente trabalho descreve a caracterização dinâmica e em vácuo de uma balança de impulso desenvolvida em um trabalho anterior para aplicação na medição de empuxos e impulsos de propulsores de plasma pulsado. Os principais objetivos são a determinação da função de transferência da balança de empuxo, medição dos impulsos com um simulador de propulsor de plasma pulsado e avaliação dos efeitos das vibrações das bombas criogênicas nas medições. O sistema de calibração eletrostático simula o impulso do propulsor de plasma pulsado, gerando empuxos da mesma ordem de grandeza ( $\mu\text{N}$ ) e de muito curta duração ( $\mu\text{s}$ ), característicos de propulsores de plasma pulsado. O objetivo principal desta pesquisa é obter a resposta dinâmica da balança ao impulso de um propulsor de plasma pulsado e produzir uma curva de calibração para as condições de operação deste propulsor.*

---

**Palavras-chave:** Balança de impulso; Propulsão elétrica; Propulsor de Plasma Pulsado; Vácuo.

### 1. Introdução

Nos últimos anos tem-se observado uma crescente demanda por nano e picosatélites [Bouwmeester and Guo 2010]. A crescente utilização destes dispositivos também aumenta a necessidade por propulsores pequenos, pois conferem aos pequenos satélites uma melhoria nas suas capacidades de manobra, compensação do arrasto, o que aumenta a vida útil do satélite, mudança de órbita e controle de atitude [Vadim and Li 2006].

Propulsores elétricos possuem características que os tornam adequados para a realização de missões espaciais. Esses propulsores podem fornecer valores altos de impulso específico utilizando valores relativamente baixos de potência [Sutton and Biblarz 2016], como é o caso do propulsor de plasma pulsado [Burton and Turchi 1998].

Atualmente, alguns autores estudam os propulsores de plasma pulsado com geometrias assimétricas, pois se notou que possuem um desempenho melhorado com esta configuração [Ling et al. 2018]. Outros autores estudam propulsores de plasma pulsados auxiliados por laser, que demonstraram aumentar o impulso por disparo do propulsor [Kamezaki et al. 2018]. Porém, nenhum autor ainda foi capaz de determinar o perfil de empuxo desse tipo de propulsor. Este trabalho tem como objetivo obter a resposta dinâmica da balança de impulso e ajustar uma curva de calibração para as condições de operação deste propulsor.



A balança de impulso desenvolvida no INPE, [Anselmo 2017], tem características semelhantes àquela construída por [Ciaralli et al. 2013], porém, conta com um atuador eletrostático de calibração e simulador de propulsores. A Figura 1 mostra a balança dentro da câmara de vácuo do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LABCP)

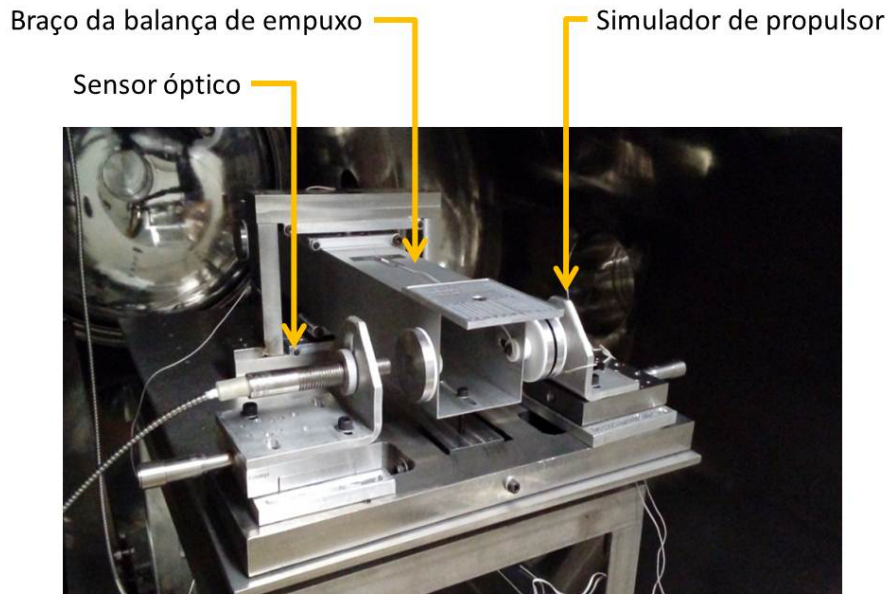


Figura 1. Balança de impulso desenvolvida no INPE

## 2. Metodologia

Os principais componentes da balança de empuxo são dois pivôs, que correspondem a molas de torção, e estão localizados na posição intermediária do braço da balança. Os pivôs de torção fornecem uma força restauradora, conforme o esquema mostrado na Figura 2. Esta força restauradora gera uma aceleração angular, que é descrita pela Equação (1) [Rao and Yap 2011].

$$J\ddot{\theta}(t) + c\dot{\theta}(t) + k\theta(t) = T(t) \quad (1)$$

Onde  $J$  é o momento de inércia de massa do braço da balança,  $c$  é o coeficiente de amortecimento devido aos efeitos dissipativos,  $k$  é o coeficiente elástico do pivô,  $T$  é um torque genérico aplicado ao braço da balança, especificamente neste caso se trata do empuxo do propulsor, e  $\theta$  é o ângulo de torção, conforme indica a Figura 2.

Neste trabalho, não será usado um propulsor, contudo, será usado um simulador analógico de propulsor, já que o objetivo é justamente efetuar a caracterização da balança. Ele é composto por dois eletrodos, conforme mostram as Figuras 1 e 3. Um desses eletrodos está apoiado na própria balança e o outro, que possui um anel de guarda cuja função é minimizar os efeitos de borda [Heerens and Vermeulen 1975], está apoiado sobre uma base móvel. Este sistema se assemelha a um capacitor e ao ser aplicada uma diferença de potencial elétrica entre os eletrodos, uma força eletrostática é gerada, conforme a Equação (2) [Christy et al. 1979], o que faz a balança responder a este estímulo.

$$F_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \left( \frac{U}{D} \right)^2 A_1 \quad (2)$$

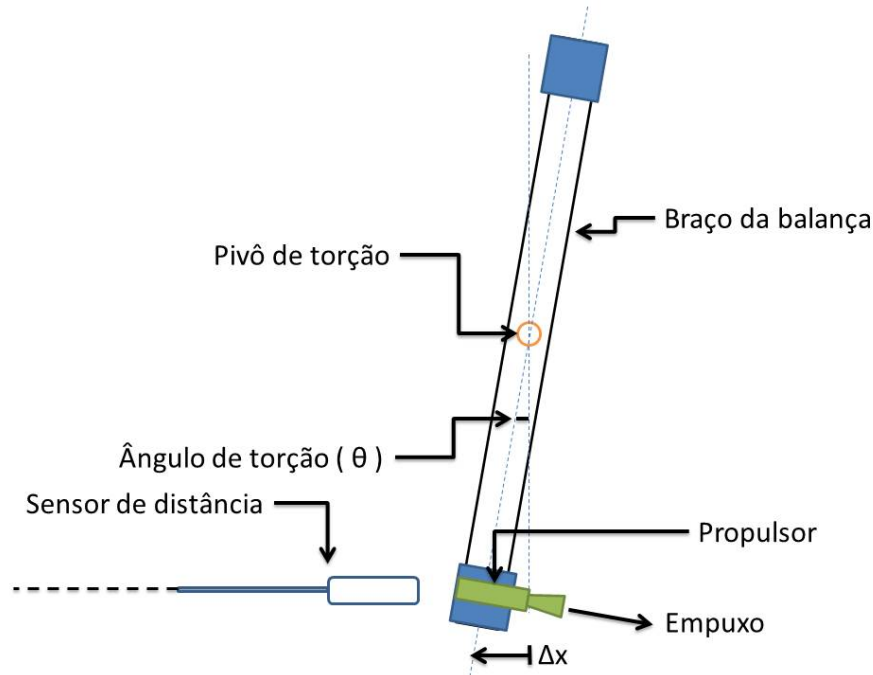


Figura 2. Esquema da balança de torção

Onde  $F_e$  é a força eletrostática,  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo,  $\epsilon_r$  é a permissividade elétrica relativa do ar,  $U$  é a diferença de potencial entre os eletrodos,  $D$  é a distância entre os eletrodos e  $A_l$  é a área do eletrodo menor.

Esta força eletrostática deve ter um período de atuação semelhante ao período de atuação dos propulsores de plasma pulsado, que possui ordem de grandeza de  $\approx 20 \mu s$  [Burton and Turchi 1998]. Como propulsores de plasma pulsado atuam em forma de pulso, será utilizado um gerador de sinais para fornecer um pulso elétrico na forma de onda quadrada. Esse pulso será amplificado por um circuito elétrico, mostrado na Figura 4, e então chegará aos eletrodos, que serão atraídos um pelo outro pela força eletrostática. A atração fará com que o braço da balança se mova.

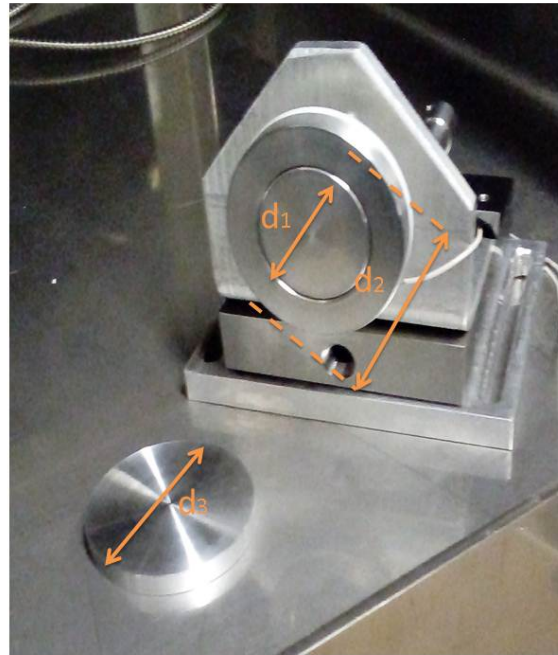
O sinal aplicado aos eletrodos do atuador eletrostático é indicado na Figura 4 com um marcador verde, próximo ao componente MOSFET IRF 840.

A função de transferência da balança ( $H(s)$ ) é encontrada através da determinação da frequência natural da balança ( $\omega_n$ ), da constante de amortecimento ( $\zeta$ ) e do momento de inércia do braço da balança ( $J$ ) conforme indica a Equação (3) e as Equações (4), (5), (6) e (7). As equações podem ser encontradas em [Ciaralli et al. 2013] e [Rao and Yap 2011] respectivamente.

$$H(s) = \frac{\frac{r_{sens}}{J}}{s^2 + 2\zeta s + \omega_n^2} \quad (3)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (5)$$



**Figura 3. Simulador de propulsor. Dimensões:**  $d_1 = 31.70 \pm 0.04 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 50.89 \pm 0.04 \text{ mm}$ ,  $d_3 = 50.89 \pm 0.04 \text{ mm}$

$$c_c = 2J\omega_n \quad (6)$$

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n \quad (7)$$

Onde  $r_{sens}$  é a distância do sensor até o pivô de torção,  $c_c$  é o coeficiente de amortecimento crítico e  $\omega_d$  é a frequência do movimento amortecido.

Usando a técnica do decremento logarítmico é possível determinar  $\zeta$  através das seguintes equações [Rao and Yap 2011].

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (8)$$

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left( \frac{x_1}{x_{N+1}} \right) \quad (9)$$

Onde  $N$  é um número inteiro e  $x_1$  e  $x_{N+1}$  é o primeiro pico e o pico de número  $N + 1$  respectivamente.

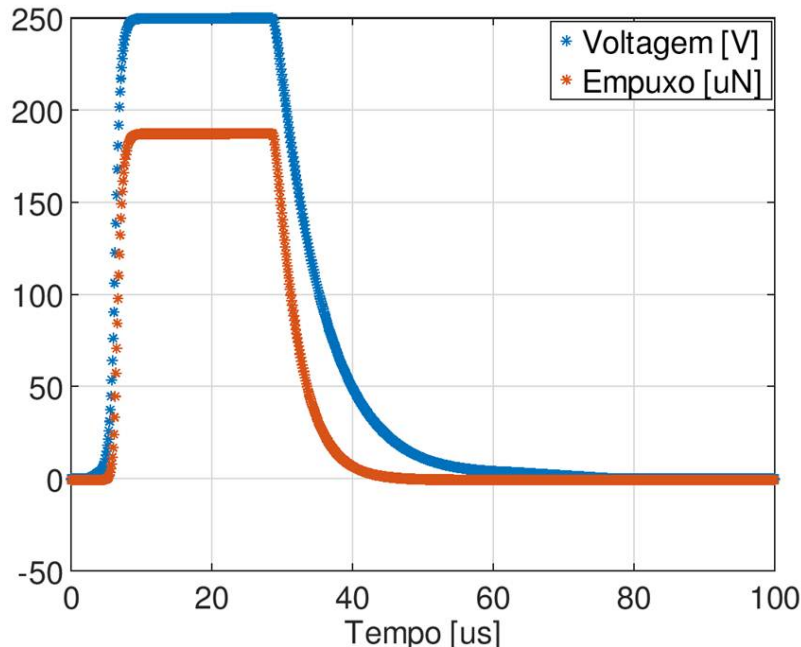
Embora o simulador analógico de propulsor forneça um pulso com uma duração muito curta, a resposta da balança pode demorar até mesmo horas para que retorne a sua posição de repouso [Grubišić and Gabriel 2010]. Por isso, é necessário um dispositivo que amortea o movimento mais intensamente quando necessário. Para este fim, pode-se utilizar um amortecedor magnético [Sodano et al. 2005] e [Soni and Roy 2013].

Freio magnético é um dispositivo que se utiliza do fenômeno das correntes circulares induzidas (*eddy currents*) [Wiederick et al. 1987]. Devido à interação entre um material não magnético





esse software, foi possível obter o sinal elétrico de saída do circuito, que é o sinal de entrada para os eletrodos. A Figura 6 mostra este sinal de saída do circuito.



**Figura 6. Empuxo gerado pelo simulador analógico de propulsor e voltagem de saída do circuito de amplificação em função do tempo**

Na Figura 6 também é mostrado o empuxo que o simulador analógico de propulsor gera. A relação entre a força de atração entre os eletrodos e a tensão aplicada a eles foi obtida através de uma calibração prévia e pode ser encontrada em [Anselmo 2017].

A Figura 7 mostra um resultado preliminar do que se espera da resposta da balança devido a um sinal elétrico de 300 V nos eletrodos em forma de pulso. Este experimento foi realizado em condições atmosféricas e ainda sem o circuito de amplificação, para gerar a tensão, os eletrodos foram diretamente conectados a uma fonte de tensão, que forneceu 300 V.

Na Figura 7, a ordenada representa o deslocamento que o braço da balança sofreu em relação à posição em que se encontra o sensor de deslocamento. Nota-se que a balança realizou um movimento oscilatório em torno de sua posição inicial, cujo eletrodo está a uma distância de aproximadamente  $33 \mu\text{m}$  do sensor. Outra característica importante de se notar é que o movimento é amortecido, ou seja, a amplitude diminui ao longo do tempo. Isso se deve à influência do atrito mecânico da própria balança com seu suporte principalmente, mas também há a resistência do ar, entretando, em escala muito menor.

#### 4. Conclusão

O objetivo deste trabalho é a caracterização da balança de impulso em ambiente de vácuo, para isso, será utilizado um atuador eletrostático que gera uma força de atração entre o eletrodo do braço da balança e o eletrodo da base móvel. Foi elaborado um circuito de amplificação cuja função é amplificar o sinal de um gerador de sinais, que tem a forma de uma onda quadrada e tem duração aproximada de  $20 \mu\text{s}$ . Também foi explicado o conceito do amortecedor magnético que será construído, assim como seu esboço. Foi mostrada a metodologia de cálculo para a determinação das características dinâmicas da balança, que pode ser resumida na sua função de transferência.

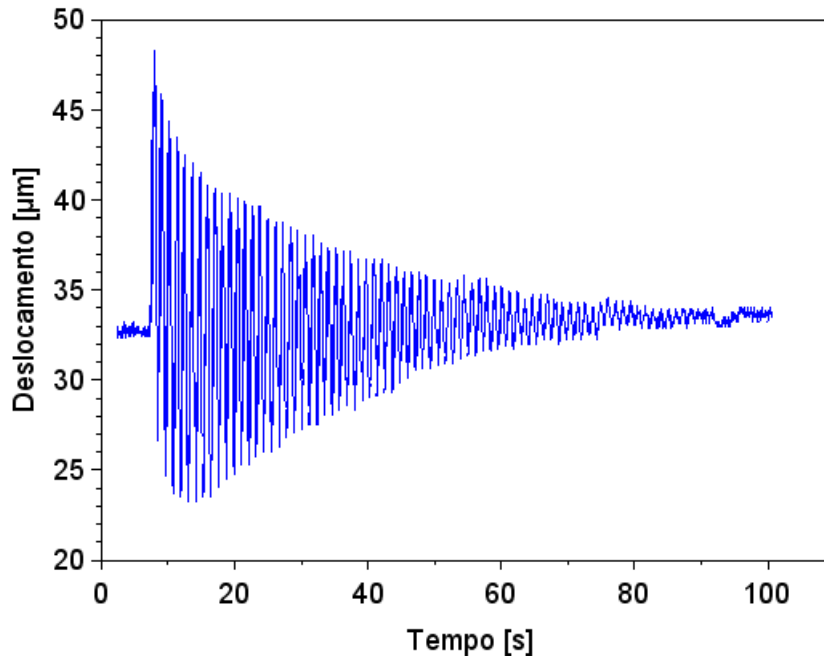


Figura 7. Resposta da balança devido a um pulso elétrico nos eletrodos

Para os trabalhos futuros, pretende-se integrar o freio magnético ao sistema e realizar os testes dentro da câmara em vácuo. Também serão determinadas as incertezas diretas, relacionadas às medições, e indiretas. Os efeitos da vibração das bombas no processo de medição também serão avaliados quando todos os subsistemas forem integrados à balança.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem à CAPES pela bolsa concedida e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), através do processo de número 2016/05927 – 3, que possibilitou esta pesquisa. Também agradecem ao Gilberto Marrega Sandonato, Marcelo Renato Anselmo, Evandro Daniel Calderaro Cotrim, Paulo Milani pelas sugestões e à empresa THORNTON ELETRÔNICA LTDA. por fornecer material para a realização deste trabalho.

## Referências

- Anselmo, M. R. (2017). Desenvolvimento de uma balança de empuxo para propulsores elétricos. Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, Brazil.
- Bae, J.-S., Kwak, M. K., and Inman, D. J. (2005). Vibration suppression of a cantilever beam using eddy current damper. *Journal of Sound and Vibration*, 284(3-5):805–824.
- Bouwmeester, J. and Guo, J. (2010). Survey of worldwide pico-and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, 67(7-8):854–862.
- Burton, R. L. and Turchi, P. (1998). Pulsed plasma thruster. *Journal of Propulsion and Power*, 14(5):716–735.
- Christy, R. W., Milford, F. J., and Reitz, J. R. (1979). *Foundations of electromagnetic theory*. Addison-Wesley.



- Ciaralli, S., Coletti, M., and Gabriel, S. (2013). An impulsive thrust balance for applications of micro-pulsed plasma thrusters. *Measurement Science and Technology*, 24(11):115003.
- Grubišić, A. and Gabriel, S. (2010). Development of an indirect counterbalanced pendulum optical-lever thrust balance for micro-to millinewton thrust measurement. *Measurement Science and Technology*, 21(10):105101.
- Heerens, W. C. and Vermeulen, F. (1975). Capacitance of kelvin guard-ring capacitors with modified edge geometry. *Journal of Applied Physics*, 46(6):2486–2490.
- Kamezaki, H., Yano, K., Kato, H., and Horisawa, H. (2018). Effect of discharge pulse delays on characteristics of a short-pulse laser-assisted pulsed plasma thruster. In *2018 Joint Propulsion Conference*, page 4590.
- Ling, W. Y. L., Zhang, S., Liu, X., Wang, N., Zhang, Z., and Tang, H. (2018). A study on asymmetric electrodes for pulsed plasma thrusters. In *2018 Joint Propulsion Conference*, page 4908.
- Rao, S. S. and Yap, F. F. (2011). *Mechanical vibrations*, volume 4. Prentice Hall Upper Saddle River.
- Sodano, H. A., Bae, J.-S., Inman, D. J., and Belvin, W. K. (2005). Concept and model of eddy current damper for vibration suppression of a beam. *Journal of Sound and Vibration*, 288(4-5):1177–1196.
- Soni, J. and Roy, S. (2013). Design and characterization of a nano-newton resolution thrust stand. *Review of Scientific Instruments*, 84(9):095103.
- Sutton, G. P. and Biblarz, O. (2016). *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons.
- Vadim, Z. and Li, L. (2006). Propulsion challenges for small spacecraft: 2005. *Tsinghua Science and Technology*, 11(5):507–514.
- Wiederick, H., Gauthier, N., Campbell, D., and Rochon, P. (1987). Magnetic braking: Simple theory and experiment. *American Journal of Physics*, 55(6):500–503.