

INSTRUMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE SENSORIAMENTO: MONTAGEM DE UMA PLATAFORMA PROTÓTIPO PARA A AQUISIÇÃO DO EMPUXO DE PROPULSORES ELETROME CÂNICOS

Eduardo Post¹, Dionatan Breskovit de Matos², Elisiane Pelke Paixão³,
Nelize Fracaro⁴, Manuel Martín Pérez Reibold⁵

¹UNIJUÍ/DECEEng/Mestrado em Modelagem Matemática – Campus Ijuí,
edupostmat@gmail.com

²UNIJUÍ/DECEEng/Mestrado em Modelagem Matemática – Campus Ijuí,
breskovit.mat@gmail.com

³UNIJUÍ/DECEEng/Curso de Engenharia Elétrica da UNIJUÍ– Campus Ijuí,
elisianep251@gmail.com

⁴UNIJUÍ/DECEEng/Mestrado em Modelagem Matemática – Campus Ijuí,
nelize_fracaro@hotmail.com

⁵UNIJUÍ/DECEEng/Mestrado em Modelagem Matemática – Campus Ijuí,
manolo@unijui.edu.br

RESUMO: É sabida a importância da utilização de uma plataforma experimental para a aquisição de dados. Para a modelagem matemática via Identificação de Sistemas, tal emprego torna-se tarefa fundamental. O presente artigo objetiva realizar uma descrição do conjunto para medir o empuxo de propulsores eletromecânicos utilizados em aeronaves do tipo multirrotor. O empuxo caracteriza-se como uma variável de suma importância ao estudar ou projetar um veículo aéreo não tripulado. Variáveis como: torque, velocidade angular e potencial elétrico, também necessitam serem obtidas. Entretanto, a forma com que essas variáveis serão mensuradas ainda está em processo de desenvolvimento, não sendo descrita neste trabalho. Acredita-se que o emprego de uma célula de carga, *strain gauge* e Ponte de *Wheatstone* consiste numa maneira eficaz de compor o conjunto para medir o empuxo. Foram alcançados resultados satisfatórios, pois se obteve linearidade entre as variáveis tensão e deformação, de acordo com o que é exposto na literatura.

Palavras Chaves: Multirrotor; Identificação de Sistemas; Plataforma experimental.

1 INTRODUÇÃO

Um veículo aéreo não tripulado (VANT) ou do inglês *UAV (Unmanned Aerial Vehicle)* consiste em um veículo de pequeno porte caracterizado pela ausência de um piloto embarcado. Em função disso, este tipo de aeronave pode ser utilizado em situações que possam acarretar perigo à vida humana.

Um VANT é composto por vários propulsores eletromecânicos, os quais são alvos de estudo, por meio da modelagem matemática, a fim de aprimorar seu desempenho. Entretanto, nesses propulsores há muitos fenômenos difíceis de serem observados. Isso inviabiliza as técnicas de modelagem que exigem conhecimento aprofundado do sistema e que se utilizam das leis físicas presentes no mesmo.

Nesse sentido, a utilização de uma plataforma experimental é fundamental para a obtenção de dados para a posterior realização da modelagem matemática via Identificação de Sistemas ou modelagem caixa preta. Nesta, praticamente não é necessário nenhum conhecimento prévio do sistema, bastando possuir medidas de entrada e saída (AGUIRRE, 2004).

O presente trabalho é uma produção da disciplina de Instrumentação e Aquisição de Dados do programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da UNIJUÍ. Nesta, propôs-se a realização da instrumentação de um sistema de sensoriamento. Dessa forma, apresenta-se uma plataforma experimental que está sendo desenvolvida e caracterizam-se as partes que compõem o conjunto para mensurar uma variável importante para o estudo de VANTs: o empuxo. O objetivo principal consiste na descrição da montagem desse sistema de aquisição de dados.

O trabalho organiza-se da seguinte forma: A seção 2 apresenta a metodologia e breve descrição da plataforma. Na seção 3 caracterizam-se cada uma das partes do conjunto e descrevem-se alguns resultados quanto à eficácia da referida plataforma. Por fim, trazem-se as conclusões.

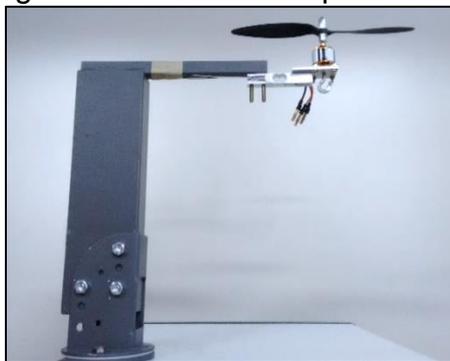
2 METODOLOGIA/ DETALHAMENTO DAS ATIVIDADES

A arquitetura de um VANT é composta por vários propulsores eletromecânicos, organizados de forma a realizar o voo horizontal, vertical ou pairado. Um propulsor é constituído de hélice, motor *brushless* e controlador eletrônico de velocidade (*ESC – Eletronic Speed Controler*).

A propulsão caracteriza-se pelo processo em que ocorre a mudança do estado de movimento ou de repouso de um corpo em relação a um dado referencial (RODRIGUES, 2017). Utiliza-se a modelagem matemática para aperfeiçoar o desempenho destes propulsores, através da Identificação de Sistemas. No entanto, para obtenção do modelo matemático, torna-se indispensável a obtenção de dados através de plataformas experimentais.

Diante deste contexto, vem sendo desenvolvida uma plataforma experimental (Figura 1) por uma aluna bolsista de iniciação científica do curso de Engenharia Elétrica. A mesma visa obter dados representativos do voo de veículos aéreos não tripulados (VANTs) do tipo multirrotores (que possuem múltiplos rotores).

Figura 1: Plataforma experimental



Fonte: PAIXÃO, SAUTHIER e REIMBOLD, 2017

Uma das variáveis importantes é o empuxo. De acordo com Silva e Cordeiro (2017), o empuxo consiste em um vetor de força para cima, surgido

pela redução da pressão nas hélices, obtida pelo aumento da velocidade de rotação das mesmas. A referida bolsista identificou como plataforma ideal para medir o empuxo, uma balança eletrônica.

A mesma constitui-se por uma estrutura de ferro e é composta por uma célula de carga, na qual se encontram o *strain gauge* e a Ponte de *Wheatstone*. (PAIXÃO, SAUTHIER e REIMBOLD, 2017).

Nesse sentido, no presente trabalho, de cunho teórico-prático, serão apresentados e caracterizados os componentes que integram o conjunto para a medição do empuxo, bem como, um teste para verificar a eficácia da plataforma experimental em desenvolvimento.

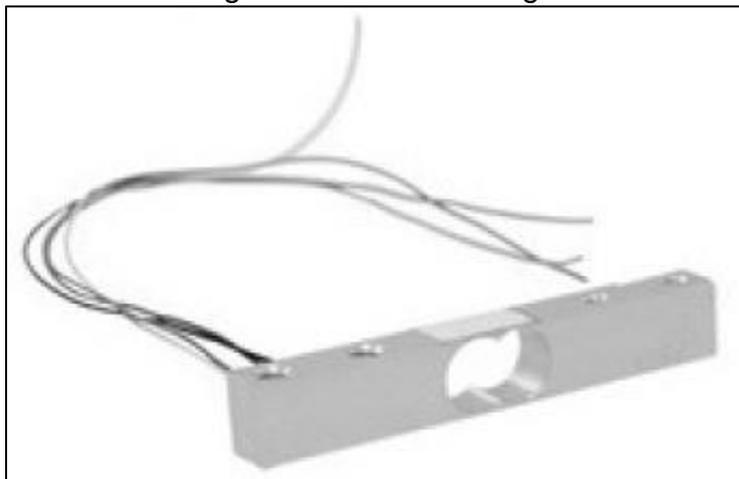
3 RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 CÉLULA DE CARGA

Célula de carga é uma estrutura eletromecânica que, ao receber esforços, se deforma. O valor da deformação é convertido em tensão. Ela se constitui de um ou mais extensômetros, dependendo da aplicação desejada para a célula, e de um circuito conhecido como Ponte de *Wheatstone*. (CARER e CARRARO, 2017).

Uma das principais aplicações da célula de carga é nas balanças comerciais. A célula de carga utilizada na plataforma é ilustrada na figura 2.

Figura 2: Célula de carga



Fonte: PAIXÃO, SAUTHIER e REIMBOLD, 2017

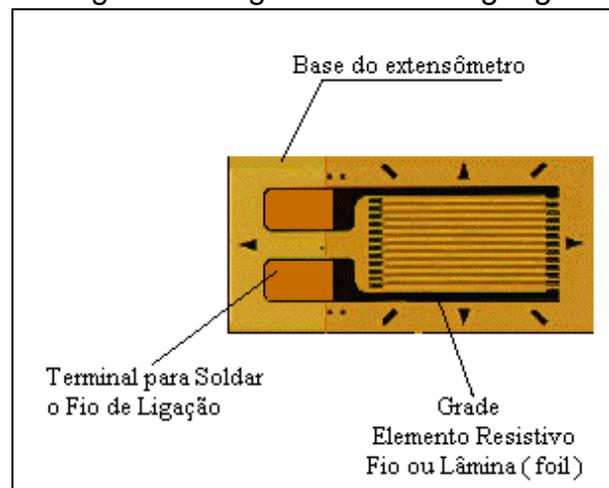
3.2 STRAIN GAUGE

Também conhecido por extensômetro, o *strain gauge* é um sensor tipo folha de deformação mecânica localizada. Como ele fornece um sinal elétrico, é bastante utilizado em células de carga, principalmente em balanças eletrônicas. (WEBER, 2017). Para Helfrick e Cooper (1994) extensômetros são transdutores, em que um deslocamento mecânico é convertido em uma variação de resistência elétrica.

O extensômetro é um resistor composto de uma fina camada de material condutor, depositado sobre um composto isolante (Figura 3). Ele é colado

sobre uma estrutura de teste, sendo sensível, transformando as variações de dimensão da estrutura em variações de sua resistência elétrica.

Figura 3: Diagrama do *strain gauge*



Fonte: PORTINOI, 2017

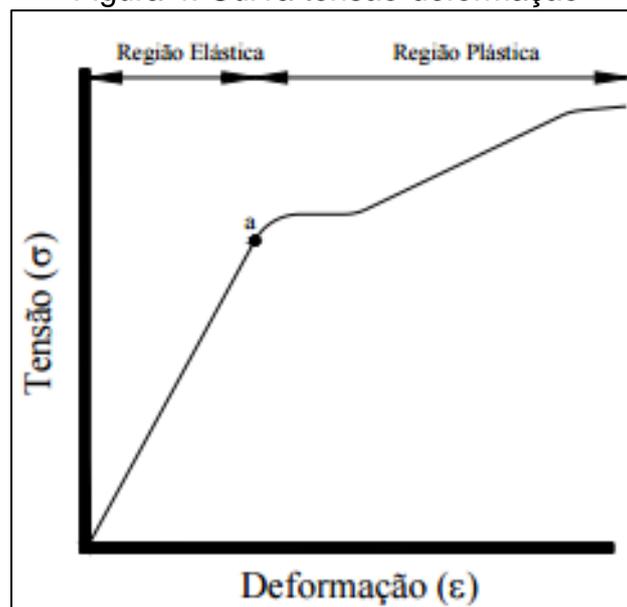
A lei de Hooke (Eq. 1) rege o processo de deformação desde que não se extrapole a região elástica do material.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Eq. 1}$$

onde σ é a tensão, E é a constante do módulo de elasticidade do material, também conhecida como Módulo de Young, e ε é a deformação.

A lei de Hooke estabelece uma relação linear entre a tensão e a deformação. Entretanto essa linearidade não se mantém para valores altos de deformação. Ela só é válida na chamada região elástica de tensão, na qual o carregamento é reversível. Passando do limite elástico, na denominada região plástica, a lei de Hooke já não é mais aplicável, pois o material começa a se comportar de forma irreversível. (UNICAMP, 2017). Isto pode ser visualizado na figura 4.

Figura 4: Curva tensão-deformação



Fonte: ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2017

Dessa forma, o extensômetro é baseado no fato de que os metais tem sua resistência elétrica alterada ao sofrerem uma deformação. A resistência elétrica pode ser descrita por:

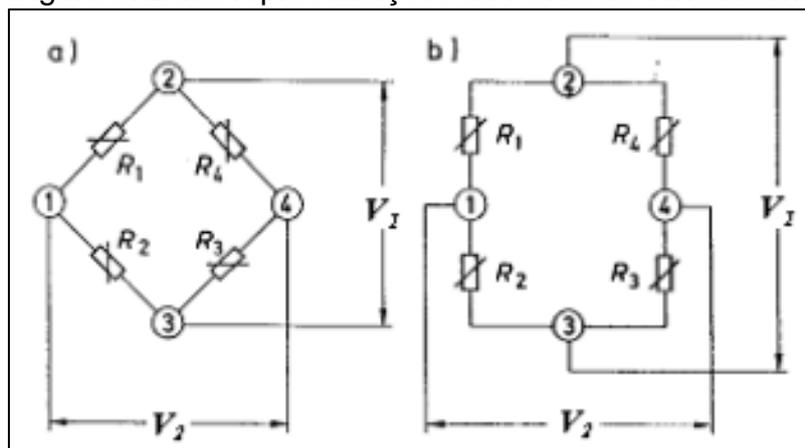
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{Eq. 2}$$

Aqui, ρ é a resistividade do material, l é o comprimento e A é a área de seção transversal.

3.3 PONTE DE WHEATSTONE

São utilizados circuitos especiais para medir a deformação com extensômetros, ou seja, as variações de resistência dentro de um circuito elétrico. Estas são valores muito pequenos, o que não é fácil de medir. Para isso, é utilizado um circuito conhecido como Ponte de *Wheatstone* (Figura 5). É bastante utilizada justamente por apresentar uma maior precisão para medir pequenas variações de resistência. (ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2017).

Figura 5: Duas representações da Ponte de *Wheatstone*



Fonte: GRANTE, 2017

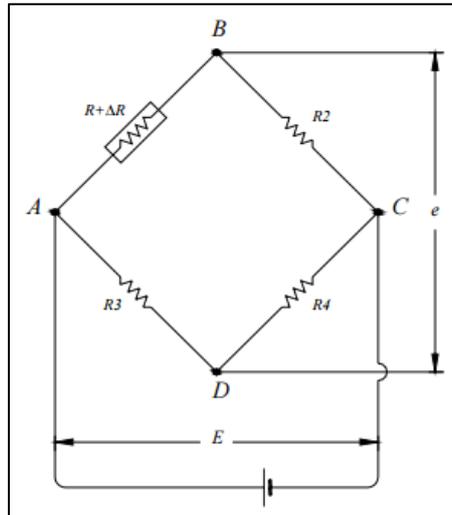
As resistências R_1, R_2, R_3 e R_4 formam os quatro braços deste circuito. Estas são excitadas por uma tensão V_1 que é conectada nos pontos 2 e 3. O sinal de resposta (V_2) dá-se nos pontos 1 e 4. Essa ponte funciona com uma diferença de potencial (ddp) V_1 que é aplicada entre dois pontos (2 e 3), a ddp é dividida para os dois braços R_1, R_4 e R_2, R_3 . A resistência de cada braço da ponte contribui para o equilíbrio da mesma, e uma ddp pode ser medida entre os pontos 1 e 4 do circuito. (GRANTE, 2017). Assim, medidas da ddp na entrada e saída da ponte se relacionam pela equação de equilíbrio da ponte (Eq. 4).

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad \text{Eq. 3}$$

A ponte estará equilibrada ou em balanço, quando os valores das resistências obedecerem a esta relação, ou quando os mesmos forem todos iguais. Assim se terá $V_2 = 0$.

Se um extensômetro for colocado no lugar de uma das resistências (Figura 6), e este sofrer uma deformação, alterando a resistência para $R + \Delta R$, existirá uma tensão elétrica na saída da ponte.

Figura 6: Circuito em Ponte de *Wheatstone*



Fonte: ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2017

A tensão de saída será proporcional à variação na resistência do extensômetro. Dessa forma, a tensão de saída é proporcional à deformação. Então para medir essa deformação, basta medir a tensão de saída da ponte (ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2017).

A figura 7 apresenta configurações da ponte em função da configuração e quantidade de extensômetros.

Figura 7: Tipos de montagem de extensômetros em ponte de *Wheatstone*

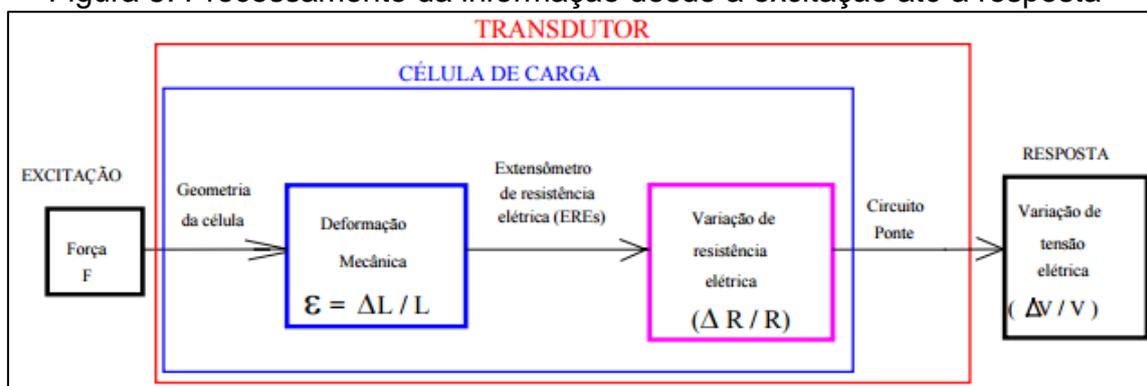
Nº	Configuração	S.G. ativos	Configuração da ponte	Sinal de saída
1		1		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G \cdot \epsilon}{4}$
2		2		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{(1+\nu)K_G \cdot \epsilon}{4}$
3		2		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G \cdot \epsilon}{2}$
4		4		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{2 \cdot (1+\nu)K_G \cdot \epsilon}{4}$
5		4		$\frac{V_o}{V_i} = K_G \cdot \epsilon$

Fonte: USP, 2017

3.4 FUNCIONAMENTO DA BALANÇA EXPERIMENTAL

Na balança, é aplicada uma força na célula de carga, por meio de massas. Estas provocam deformações, as quais são transformadas em variações de resistências elétricas, por meio dos extensômetros colados. Essas resistências são ligadas na Ponte de *Wheatstone* que vai retornar a medida da deformação. Um esquema desse processo é apresentado na figura 8.

Figura 8: Processamento da informação desde a excitação até a resposta



Fonte: WEBER, 2017

Ainda é utilizado um módulo conversor e amplificador HX711 de 24 bits que converte alterações de valor de resistência dos sensores *strain gauge* em dados digitais e funciona como um amplificador de sinal para oferecer dados mais exatos. É ele quem mede os valores de tensão que serão relacionados com a deformação que a célula de carga está sofrendo. Os valores das deformações são apresentados em um *display*, como mostra a Figura 9.

Figura 9: *Display* indicando a medida da deformação



Fonte: Autoria própria

Por meio dessa balança, foi possível a obtenção dos valores de tensão e deformação referentes às forças aplicadas através de massas (com variação de 0,05 kg). Esses dados são apresentados na tabela a seguir:

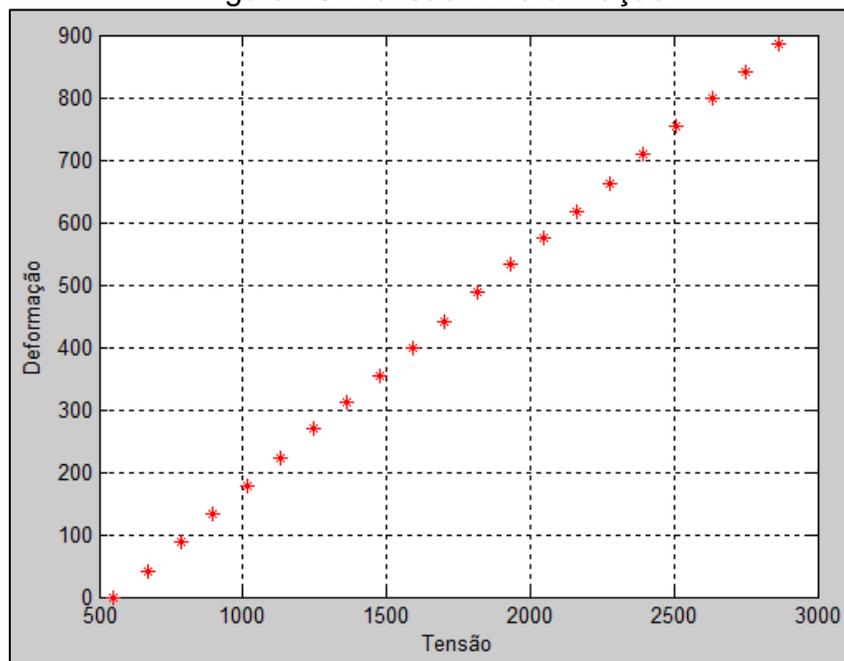
Tabela 1: Deformação e tensão em função das massas utilizadas

MASSA (Kg)	DEFORMAÇÃO ($\mu\epsilon$)	TENSÃO (mV)
0	0	551
0,05	41	668
0,1	89	783
0,15	133	897
0,2	178	1014
0,25	222	1130
0,3	269	1247
0,35	311	1361
0,4	355	1477
0,45	399	1592
0,5	442	1699
0,55	488	1816
0,6	532	1932
0,65	574	2046
0,7	618	2162
0,75	662	2276
0,8	708	2392
0,85	754	2508
0,9	799	2632
0,95	842	2748
1	886	2865

Fonte: PAIXÃO, SAUTHIER e REIMBOLD, 2017

Utilizando-se do *software* MatLab pôde-se plotar o gráfico (Figura 10) que relaciona a tensão com a deformação.

Figura 10: Tensão x Deformação



Fonte: Autoria própria

Percebe-se claramente a relação linear entre essas duas variáveis, verificando, dessa forma, a eficácia da plataforma experimental.

4 CONCLUSÕES

Os *strain gauges* são sensores elétricos que se tornaram atrativos pela sua precisão e versatilidade. Possuem outras aplicações que não só a de medir deformações. Através desse sensor é possível também medir deslocamento, força, torque, aceleração, vazão, pressão, temperatura, entre outras grandezas. Foi possível observar também a aplicação desses sensores em células de carga, seu funcionamento, bem como, o emprego da Ponte de *Wheatstone* para retornar o valor da deformação causada na célula de carga em função da aplicação de uma força. A plataforma mostra-se muito bem desenvolvida, pois é sabida a obtenção de resultados satisfatórios quanto à linearidade das variáveis: tensão e deformação. Propostas de trabalhos como esta, contribuem significativamente para a compreensão de processos físicos e de outras áreas do conhecimento, neste caso, a Engenharia Elétrica. Este fato é imprescindível, em programas de Pós-Graduação interdisciplinares, para que os acadêmicos adquiram conhecimento para o desenvolvimento de trabalhos relacionados aos temas de suas dissertações.

5 REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2004.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. **Extensometria básica**. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2017.

CARER, M; CARRARO, E. **Célula de carga**. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/celulas-de-carga-experimento.html>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

GRANTE - GRUPO DE ANÁLISE E PROJETO MECÂNICO. **Apostila de Extensometria**. Disponível em: <<http://www.grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2017.

HELFRICK, A. D.; COOPER, W. D. **Instrumentação eletrônica moderna e técnicas de medição**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.

PAIXÃO, E. P.; SAUTHIER, L. F.; REIMBOLD, M. M. P. **Ensaio de células de carga**. Disponível em: <<https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/6696/5465>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

PORTINOI, M. **Extensometria**: história, usos e aparelhos. Disponível em: <<https://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

RODRIGUES, G. **Identificação de sistemas dinâmicos não-lineares utilizando modelos narmax polinomiais aplicação a sistemas reais**. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUDB-8D3GC3>>. Acesso em: 24 mai. 2017.

SILVA, L. P.; CORDEIRO, C. S. **Quadricóptero, aspectos gerais e análises da propulsão elétrica**. Disponível em: <<http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos11/39614431.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2017.

UNICAMP. **Medição de deformação, tensão, força e movimento**. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~instmed/Deformacao_Torque.htm>. Acesso em: 27 fev. 2017.

USP. **Extensômetros Elétricos**. Disponível em: <http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3086/Extensometros_eletricos.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2017.

WEBER, A. L. **Metrologia e instrumentação**: extensometria. Disponível em: <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauche%20extensometria.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2017.