

4 Bancada Experimental e Aquisição de Dados

Com o objetivo de avaliar e complementar a análise das equações matemáticas desenvolvidas no capítulo 2, faz-se necessário realizar práticas experimentais. Com os dados experimentais comprovar-se-á se os fundamentos teóricos e numéricos empregados descrevem a dinâmica do sistema real.

Para o trabalho experimental, utiliza-se uma bancada equipada com diferentes dispositivos e instrumentos necessários para medições e aquisição de dados. A bancada é composta de elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos e está montada no Laboratório de Dinâmica e Vibrações da PUC-Rio.

Nesta parte do trabalho, além de apresentar a descrição da bancada e instrumentos, mostram-se as curvas características do motor elétrico assim como as curvas de calibração dos sensores.

4.1. Características Construtivas da Bancada

A Fig. 24 apresenta uma foto da vista geral da bancada, que consta de um rotor em balanço num eixo, o estator (anel) e os diferentes equipamentos para aquisição de dados. Nesta foto, destacam-se: a montagem do motor elétrico; os sensores de deslocamento e os dispositivos eletrônicos.

A bancada é constituída pelos seguintes componentes:

- Eixo de aço inoxidável retificado, comprimento 1000mm e diâmetro 8mm.
- Disco de aço 1020, diâmetro 100mm e espessura 40mm. O disco está localizado a 620mm do acoplamento entre o eixo do motor e o eixo do rotor.
- Anel de aço 1020, diâmetro interno 101.8mm, e diâmetro externo 113.8mm.
- Uma estrutura base que suporta o estator.
- Motor elétrico com inversor de frequência.
- Sensores e dispositivos elétricos.

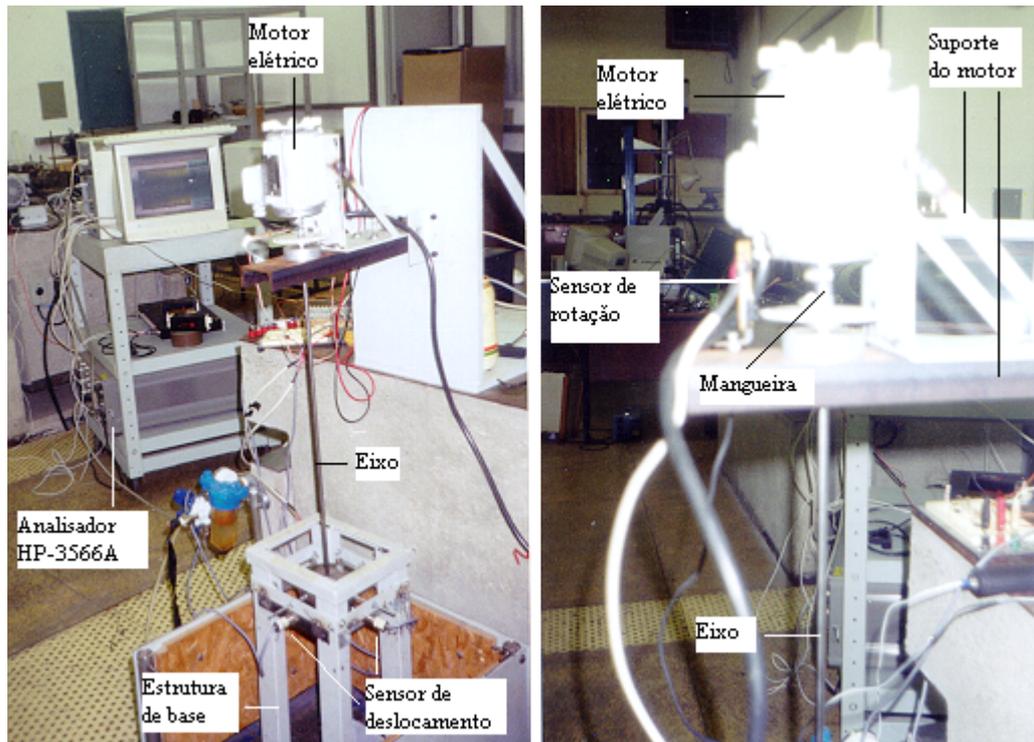


Figura 24 – Vista geral da bancada e equipamentos

O estator está fixo numa estrutura de base, como se mostra na Fig. 25, através de quatro parafusos dispostos simetricamente. O acoplamento motor–eixo é feito através de uma pequena mangueira flexível, este acoplamento é simples e tem a vantagem de absorver os desalinhamentos da montagem. Um motor elétrico AC controlado por um inversor de frequência aciona o conjunto eixo-rotor.

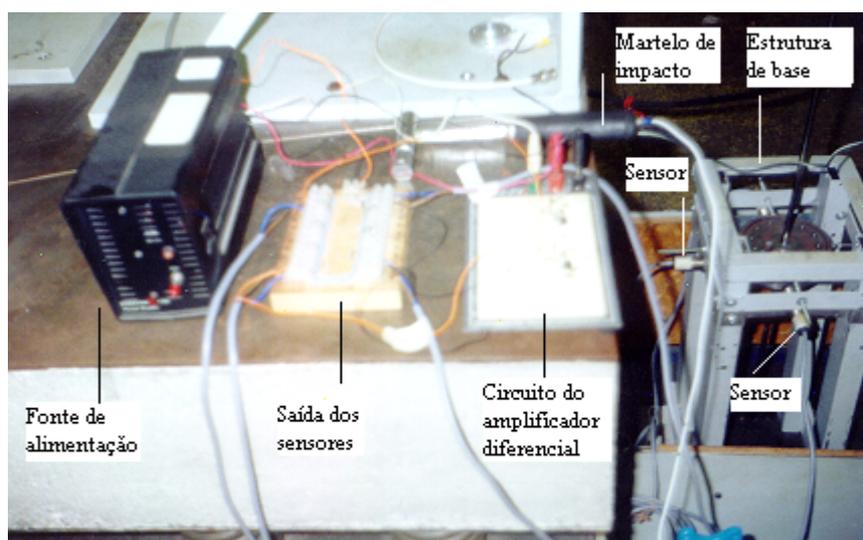


Figura 25 – Fixação do estator à estrutura e sensores de deslocamento

O esquema final com o qual foram feitas as medições está mostrado na Fig. 26.

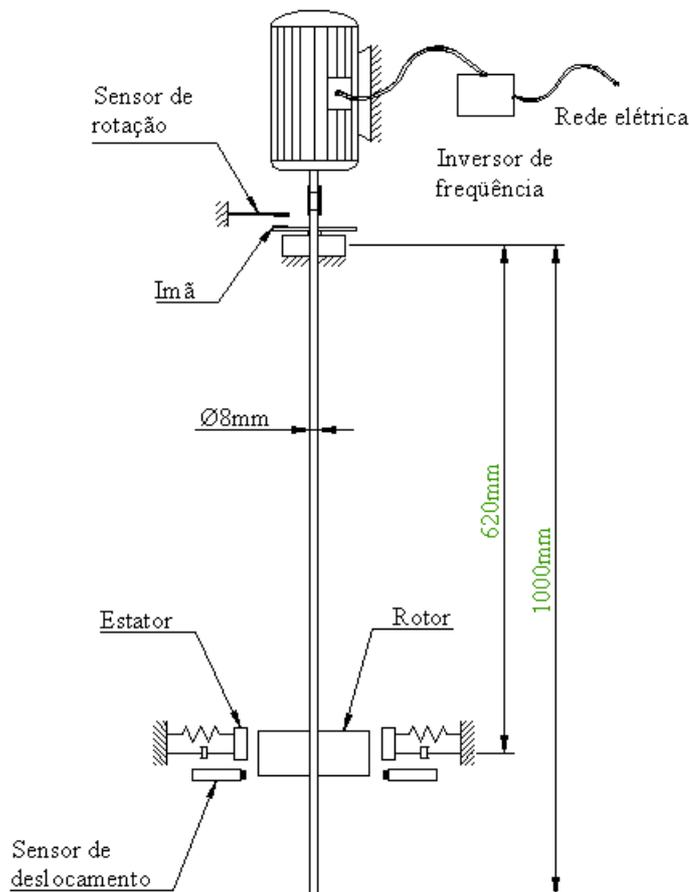


Figura 26 – Disposição final do sistema eixo-rotor-estator

4.2. Equipamento Para Aquisição de Dados

Foram usados diversos equipamentos e instrumentos para uma adequada captação dos dados. Alguns dos dispositivos precisaram ser calibrados na própria bancada para se obter uma relação adequada das grandezas necessárias.

4.2.1. Motor Elétrico com Inversor de Frequência

Para acionar o conjunto eixo-rotor, é necessária uma fonte de energia. Esta fonte de energia é elétrica que, através de um motor elétrico, gera um torque sobre o rotor do motor. Este motor elétrico é comandado por um inversor de frequência,

cuja faixa de operação vai de 0 até 60Hz. O motor é de 4 pólos e sua velocidade máxima de rotação é de 1800 rpm.

As características gerais do motor elétrico são:

- Motor de indução bifásico de 4 pólos.
- Carcaça fechada com ventilação externa.
- Potência: 1/6CV (0.12 kW)
- Tensão e corrente nominal: 220V e 1.1A, respectivamente.
- Rotação variável comandada por um inversor de frequência.

Pelo fato do motor ser de 4 pólos, a frequência apresentada no inversor e a frequência de rotação real do motor estão na relação de 2:1, por exemplo: se o inversor mostra uma frequência de 20Hz, a rotação real do eixo do motor elétrico é de 10Hz.

Curva Característica do Motor Elétrico:

O torque do motor elétrico é função da velocidade de giro do motor. Uma maneira de encontrar o torque é através de uma formulação matemática, usando as equações da eletricidade e da mecânica em conjunto. O estudo analítico para o motor elétrico empregado é um pouco complicado, já que, ele é comandado por um inversor de frequência, cuja dinâmica é complexa. Uma outra maneira de obter a curva característica do motor é mediante experimentação, e foi desta forma que se encontraram as curvas do torque para diferentes velocidades de giro do motor. Considerou-se o motor já unido ao sistema eixo-rotor medindo-se a velocidade para torques de frenagem aplicados nesta. No apêndice A mostra-se o desenho esquemático onde realizou-se o ensaio de fricção mecânica.

Os dados experimentais para obter as curvas características do motor estão na tabela 3, estes dados foram obtidos do ensaio de fricção mecânica, Crandall [23]. Na Fig. 27 mostram-se três curvas do torque do motor para diferentes frequências do inversor; uma para 2x12.0Hz, outra para 2x9.0Hz e outra obtida como a média das duas curvas anteriores.

Nas equações de movimento desenvolvidas no capítulo 2, representou-se com T_m ao torque de acionamento do sistema eixo-rotor. Para as simulações numéricas, o T_m será a curva média (encontrada acima) multiplicada por uma

constante adequada C . Esta constante C é proporcional à frequência imposta no inversor, e irá mudando conforme se mude a frequência do inversor.

Para encontrar as curvas características do motor empregaram-se polinômios de terceira ordem. Estes polinômios foram obtidos através do método dos mínimos quadrados. É possível usar polinômios de ordem maior, que ajustem melhor os dados colhidos, mas, estes polinômios geram erros muito grandes quando são usados na solução numérica das equações de movimento, já que, os erros cometidos nas operações de potenciação são maiores à medida que a ordem do polinômio aumenta.

Frequência do inversor = 2x12.0Hz			Frequência do inversor = 2x9.0Hz		
Vel., Hz	Vel., rad/s	Torque, N-mm	Vel., Hz	Vel., rad/s	Torque, N-mm
0.00	0.00	360.37	0.00	0.00	229.31
0.20	1.26	346.75	0.50	3.14	225.51
0.50	3.14	313.29	0.60	3.77	211.89
1.50	9.42	283.77	1.00	6.28	213.91
3.08	19.35	264.66	1.30	8.17	217.06
5.00	31.42	248.98	2.50	15.71	204.51
6.20	38.96	229.86	4.00	25.13	201.36
6.50	40.84	229.31	4.30	27.02	185.40
7.50	47.12	210.19	4.40	27.65	191.28
7.90	49.64	210.31	5.00	31.42	177.53
8.00	50.27	196.57	5.20	32.67	182.25
8.10	50.89	193.36	5.60	35.19	165.86
8.75	54.98	167.05	5.90	37.07	160.58
8.80	55.29	172.75	6.10	38.33	150.18
9.25	58.12	153.30	6.40	40.21	162.71
9.33	58.62	157.34	7.00	43.98	131.06
9.50	59.69	143.60	7.10	44.61	147.03
9.65	60.63	133.76	7.50	47.12	127.91
9.67	60.76	131.06	8.30	52.15	94.45
10.50	65.97	100.30	8.50	53.41	80.83
10.60	66.60	84.63	8.70	54.66	60.22
11.00	69.12	69.22	8.80	55.29	46.47
11.10	69.74	52.27	8.90	55.92	29.52
11.25	70.69	39.73	9.00	56.55	0.00
11.50	72.26	19.11			
12.00	75.40	0.00			

Tabela 3 – Dados do ensaio de fricção mecânica

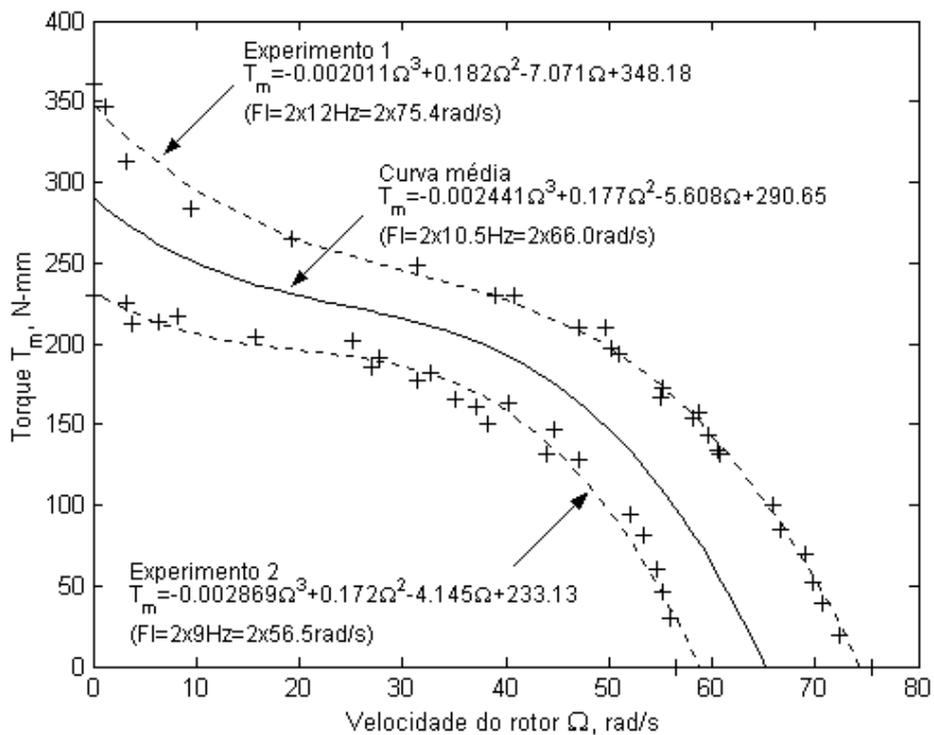


Figura 27 – Curva do motor elétrico com inversor: +++ experimental, --- curva ajustada, (FI=Freqüência do inversor)

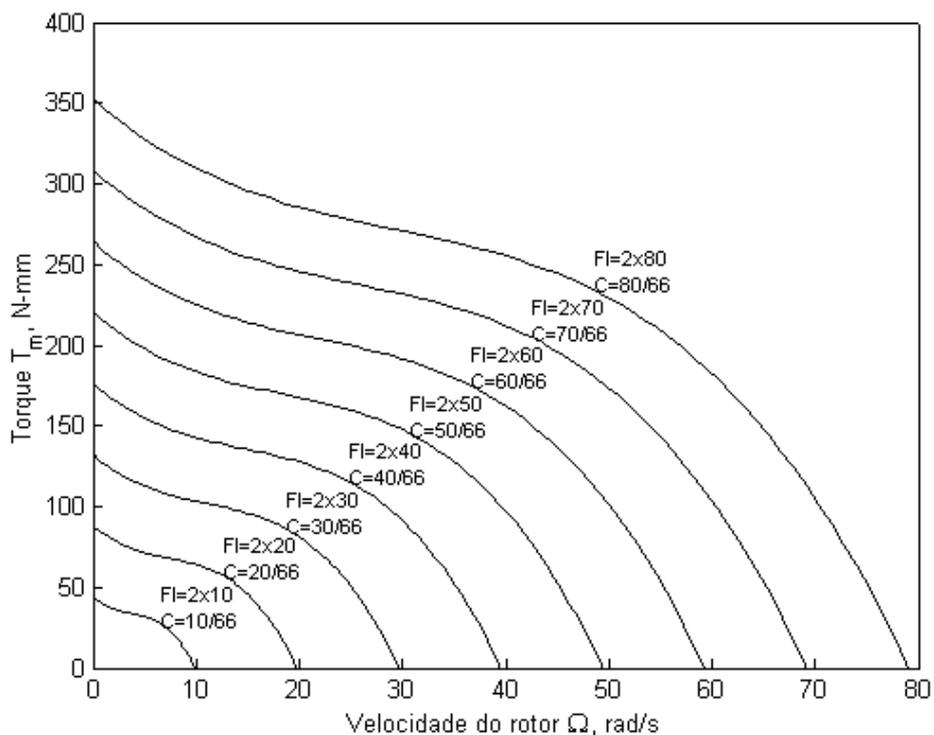


Figura 28 – Curvas do motor elétrico com inversor para diferentes freqüências do inversor: FI=2x10,2x20, ..., 2x80 rad/s (FI=Freqüência do inversor)

A Fig. 28 mostra várias curvas do torque do motor para diferentes frequências do inversor (diferentes velocidades de rotação, constantes, do eixo do motor elétrico). As curvas foram obtidas a partir da equação da curva média (cuja frequência do inversor é $2 \times 10.5 \text{ Hz} = 2 \times 66.0 \text{ rad/s}$):

$$T_m = C \left[-0.002441 \left(\frac{\Omega}{C} \right)^3 + 0.177 \left(\frac{\Omega}{C} \right)^2 - 5.608 \left(\frac{\Omega}{C} \right) + 290.65 \right] \text{ N-mm} \quad (4.1)$$

Na Eq. (4.1), C é uma constante e Ω a velocidade de rotação do rotor em rad/s. Por exemplo, para uma frequência do inversor de $2 \times 80 \text{ rad/s}$, o valor da constante será: $C = \frac{80}{66}$. Os valores da constante C , para diferentes frequências do inversor, estão mostrados na Fig. 28.

Para o torque de acionamento usado, Eq. (4.1), a Fig. 28 mostra que a velocidade máxima que o rotor pode alcançar depende do numerador da constante C . Por exemplo, para $C = \frac{150}{66}$ a velocidade de rotação máxima é 150 rad/s (23.8 Hz), e, nesta situação o torque T_m faz-se nulo. Se o torque é nulo, indica que o rotor movimenta-se com velocidade de rotação constante e máxima, no entanto, se o torque for diferente de zero, o rotor encontra-se acelerando até chegar à sua velocidade máxima. Na prática sempre haverá um torque resistivo e o sistema entrará em um regime de equilíbrio quando ambos se igualarem.

4.2.2. Sensores de Deslocamento e Velocidade

Nos ensaios experimentais foram medidos o deslocamento, no plano horizontal, do centro do rotor e sua velocidade de rotação. Para este fim, foram utilizados quatro sensores de deslocamento, dois para cada eixo, e um sensor de rotação.

Sensores de Deslocamento:

O sensor usado é do tipo indutivo, este sensor fornece uma voltagem de saída, segundo o sensor se aproxima ou se afasta de uma superfície metálica. Na montagem dos sensores tomou-se cuidado especial para que a voltagem fornecida

fique na faixa linear. Os sensores de deslocamento foram montados em pares para cada eixo (x e y), de tal forma que a diferença de voltagem de dois sensores opostos seja zero quando o rotor e estator são concêntricos. Para fazer a diferença de voltagem, foi usado um circuito eletrônico com amplificadores operacionais, como se mostra na Fig. 29. Nesta figura, V_{i1} e V_{i2} são as saídas de voltagem de dois sensores opostos, e, a diferença entre elas é representado por V_{out} .

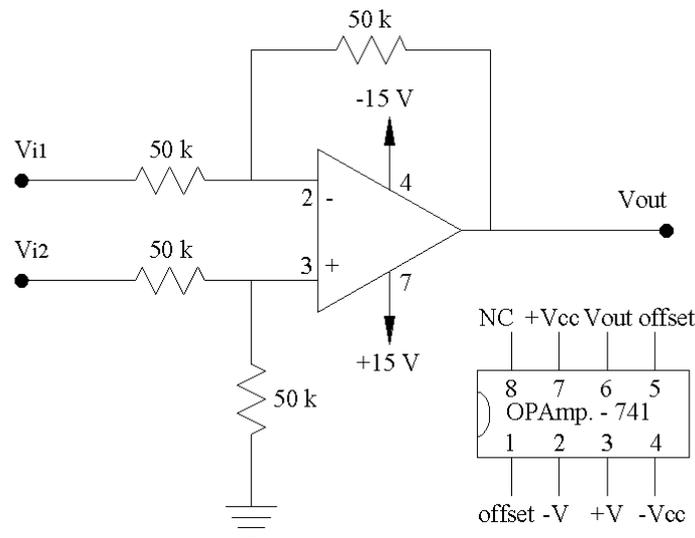


Figura 29 – Amplificador diferencial e circuito associado

O amplificador é alimentado com $\pm 15V$ e as resistências elétricas são de 50k Ohms. Este valor escolhido para a resistência elétrica garante que não haja problemas de ruído nem de corrente muito alta no circuito. Para valores de resistência muito alta ($R > 1M$ Ohms) existem problemas de ruído na aquisição de dados, e, se for muito baixo ($R < 10k$ Ohms) a corrente no circuito é muito alta.

Para determinar a posição do centro do rotor em unidades de comprimento, é necessário ter uma curva que possa converter as grandezas de voltagem em grandezas de comprimento: a esta curva a chamamos curva de calibração.

O sensor de deslocamento fornece voltagem como sinal de saída, e, para se ter grandezas de comprimento, foram feitas duas curvas de calibração, uma para cada eixo. As Figs. 30 e 31 mostram as curvas de calibração que foram obtidos a partir dos dados da tabela 4.

Eixo x		Eixo y	
V	mm	V	mm
3.192	-0.900	1.275	-0.900
2.274	-0.555	1.121	-0.775
1.922	-0.465	0.869	-0.695
1.391	-0.345	0.273	-0.515
1.106	-0.275	-0.168	-0.395
0.358	-0.115	-0.582	-0.275
-0.071	-0.025	-0.951	-0.175
-0.229	0.000	-1.541	-0.025
-0.519	0.055	-1.663	0.000
-0.990	0.165	-1.931	0.075
-1.634	0.305	-2.940	0.325
-1.810	0.345	-3.855	0.575
-2.824	0.565	-4.129	0.675
-3.786	0.805	-4.350	0.735
-3.810	0.900	-4.687	0.900

Tabela 4 – Dados para a calibração dos sensores de deslocamento

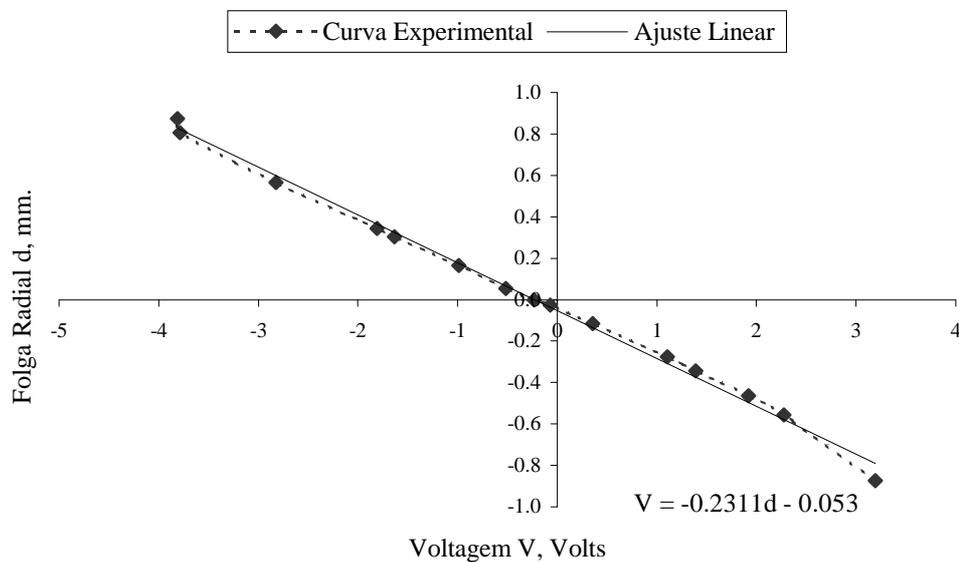


Figura 30 – Curva de calibração dos sensores: eixo x

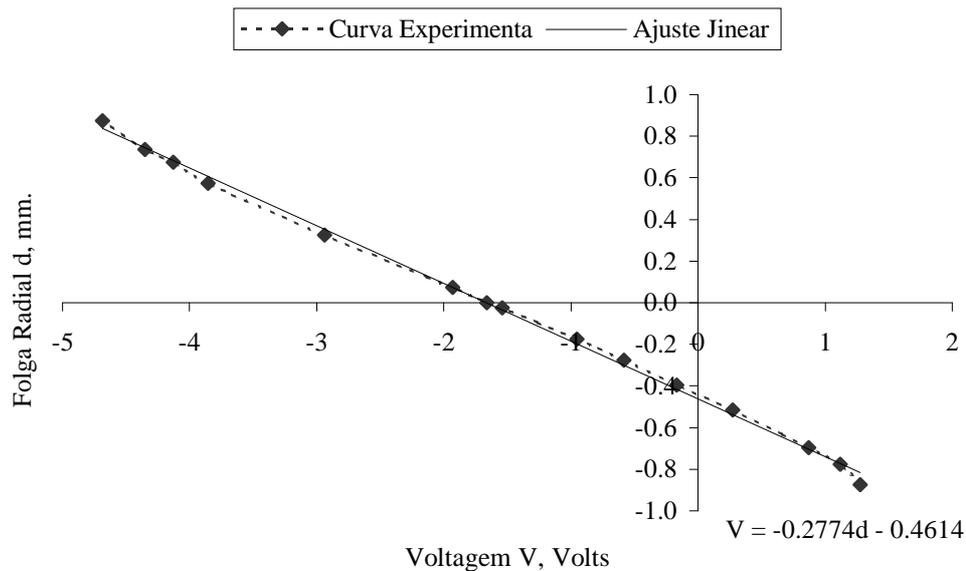


Figura 31 – Curva de calibração dos sensores: eixo y

As curvas de calibração encontradas mostram claramente que os sensores trabalham na faixa linear. As características principais dos sensores de deslocamento são:

- Marca: Balluf
- Modelo BAW 018-PF-1-K
- Princípio de Medição: Corrente indutiva

Sensor de Rotação:

Na Fig. 26 se vê a localização do sensor de rotação e um elemento metálico (ímã). O ímã está colado sobre um disco não metálico que gira solidário com o eixo. O circuito eletrônico do sensor de rotação emite um pulso elétrico cada vez que o ímã passa pelo sensor. Estes pulsos são obtidos no domínio do tempo e se faz uma Transformada de Fourier para obter a frequência de rotação.

4.2.3. Sistema de Aquisição de Dados

Para a aquisição de sinais foi utilizado um analisador de Fourier HP 3566A. O analisador consiste de um computador pessoal, um software aplicativo e um sistema de medição. O sistema permite a medição de até oito canais com uma taxa de aquisição máxima de até 12.8 kHz.