


**Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecânica**

Aperfeiçoamento da Bancada de Calibração de Tacômetros

**Elaborado por:
Franck Laurent Roland Wilfried Vignard-Rosez**

**Orientador:
Francisco E.B.Nigro**

9,0 (mov.)


**São Paulo
1998**

Franck Laurent Roland Wilfried Vignard-Rosez

Aperfeiçoamento da Bancada de Calibração de Tacômetros



Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador:
Francisco E.B. Nigro

São Paulo
1998

Dedico este trabalho à Srta. Patrícia Orozco B. de Oliveira que tem sido a grande razão e incentivo de meu aperfeiçoamento. Desejo que minha dívida com você seja inesgotável.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais: Christel P. Vignard-Rosez e Henri M. Vignard-Rosez pela incansável compreensão.

Aos meus irmãos e a todos que direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

Efetuu-se um estudo estatístico afim de avaliar o comportamento da bancada e do processo de Calibração. O estudo evidencia a partir de 1997 um aumento do erro sistemático e da dispersão dos resultados que embora continuem conforme a incerteza do procedimento, comprometem a qualidade da calibração. Por outro lado, vários clientes expuseram a necessidade de possuir uma incerteza reduzida.

Levando em consideração os pontos levantados acima, chegou-se a necessidade de aperfeiçoar a bancada e o procedimento de calibração.

Foram realizadas uma série de medições e ensaios afim de definir o comportamento de cada componente do sistema, levantando assim as falhas e os pontos passíveis de serem otimizados.

A vibração torcional apareceu como um fator decisivo na qualidade do serviço final, atuando diretamente na incerteza da referência.

Foram propostas uma série de mudanças no sistema de calibração e chegou-se numa bancada que atende aos requisitos atuais de qualidade tanto quanto à confiabilidade quanto à incerteza da referência.

RÉSUMÉ

Une étude statistique a été faite pour évaluer le comportement du processus de Calibrage. L'étude démontre à partir de 1997 une augmentation de l'erreur systématique et de la dispersion des résultats.

D'un autre côté, plusieurs clients ont exposé le besoin de posséder une incertitude réduite.

Ainsi, est apparue la nécessité d'améliorer le procédure et le système de calibrage.

Une série de mesures a été accomplie de manière à définir le comportement de chaque composant du système et de déterminer comment corriger ces défauts et comment améliorer les points faibles du système.

La vibration torcionnel est apparue comme un facteur décisif dans la qualité du service, agissant directement sur l'incertitude de la référence.

Des modification ont été proposées et ont permis de garantir la qualité du service grâce à une augmentation de la précision et de confiabilité.

INTRODUÇÃO	1
LIMITAÇÕES ATUAIS	1
PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO ATUAL	1
DETERIORAÇÃO DOS RESULTADOS	3
NECESSIDADE DE REDUZIR A INCERTEZA DOS RESULTADOS.....	5
DESCRIÇÃO DO TRABALHO.....	6
OBJETIVOS	6
CRONOGRAMA E PLANO DE TRABALHO.....	6
ESTUDO DA BANCADA:	7
VERIFICAÇÃO DO ENCODER 1800	7
SUBSTITUIÇÃO DO ENCODER 1800 POR UM ENCODER 360.....	8
MUDANÇA DE EIXO DE REFERÊNCIA	8
SUBSTITUIÇÃO DO ACOPLAMENTO,	10
SUBSTITUIÇÃO DO FREQUÊNCÍMETRO	11
ALTERAÇÃO DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO.....	12
ANÁLISE DA VIBRAÇÃO TORCIONAL	15
<i>Verificação da ocorrência do fenômeno</i>	<i>15</i>
<i>Medida da vibração torcional.....</i>	<i>16</i>
IDENTIFICAÇÃO E CORREÇÃO DO DEFEITO DA BANCADA	17
ESCOLHA DO INVERSOR.....	20
DINVERTER A.....	20
NEWTRONIC FVR.....	21
COMPARAÇÃO QUANTO AO DESEMPENHO	22
CONTROLE VIA GPIB	25
POSIÇÃO DO INVERSOR	26
CÁLCULO DA INCERTEZA	27
CONCLUSÕES	31
ANEXOS.....	32
BIBLIOGRAFIA.....	33

Calibração de Tacômetros

Aperfeiçoamento e modificação da bancada de Calibração

INTRODUÇÃO

A partir dos resultados das calibrações dos tacômetros realizadas no período de 1996 a 1997, efetuou-se um estudo estatístico afim de avaliar o comportamento da bancada e do processo de Calibração. O estudo em questão se encontra no anexo 1. O estudo evidencia a partir de 1997 um aumento do erro sistemático e da dispersão dos resultados que embora continuem conforme a incerteza do procedimento, comprometem a qualidade da calibração.

Por outro lado, o processo produtivo contemporâneo, exige limites de incerteza a cada vez mais exigentes. Vários clientes expuseram a necessidade de possuir certificados mais precisos, ou seja, com uma incerteza reduzida.

Levando em consideração os pontos levantados acima, chegou-se a necessidade de aperfeiçoar a bancada e o procedimento de calibração.

LIMITAÇÕES ATUAIS

Procedimento de Calibração Atual

Atualmente, as calibrações são realizadas conforme o procedimento técnico interno do LEDV (PTCAL-01, Rev. 1). A figura 1 abaixo, esquematiza a bancada de Calibração atual.

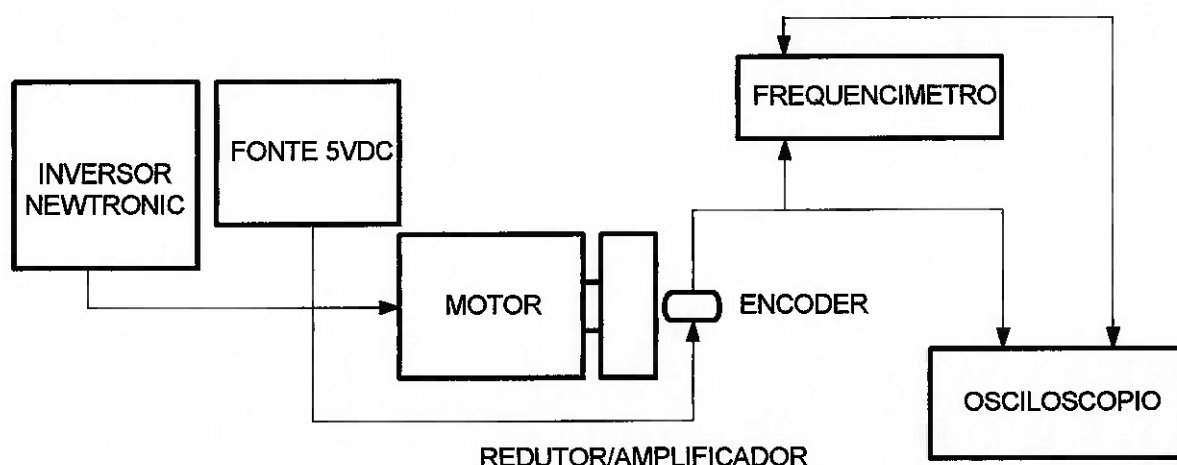


Figura 1 - Croquis da bancada de calibração

Na tabela 1, estão relacionados os equipamentos atualmente usados na calibração de tacômetros.

Tabela 1 - Relação de equipamentos utilizados na calibração

Equipamento	Ident. LEDV	Comentários
Inversor de frequência	---	Marca Fuji Electronic, N.S. 315744R015; Calibração não aplicável
Conjunto motor elétrico /reductor/multiplicador	---	Construído no IPT sob desenho N.º 01-05-58
Decodificador Óptico	TR-03	Calibração não aplicável
Frequencímetro digital	M007B	Certificado de Calibração IPT, N.º 22 038, de nov/97; Calibração bianual, rastreada ao Observatório Nacional.

A grande maioria das calibrações são efetuadas nos seguintes pontos:

- tacômetros de contato: 20, 50, 100, 200, 500, 1.000, 2.000, 5.000 e 10.000 rpm;
- tacômetros ópticos: 50, 100, 200, 500, 1.000, 2.000, 5.000, 10.000, 20.000 e 50.000 rpm;

A velocidade de rotação do eixo de saída do Conjunto reductor/multiplicador é ajustada com base na leitura do instrumento em calibração. As leituras na instrumentação de referência são obtidas utilizando-se o Decodificador Óptico, que fornece um sinal elétrico

cuja frequência é proporcional à velocidade de rotação do referido eixo, e o Freqüencímetro, para medir esta frequência.

São efetuadas três medidas para cada ponto sendo que, inicia-se com a leitura na menor rotação, acelerando, ponto a ponto até 1000 rpm. Em seguida, as segundas leituras são feitas reduzindo a rotação até o menor valor a ser calibrado e, finalmente, as terceiras leituras são feitas novamente de maneira crescente.

Para rotações superiores à 1000 rpm, muda-se a relação e as três medidas para cada ponto são feitas respectivamente de maneira crescente, decrescente e crescente.

O erro corresponde à diferença percentual (e) das médias das 3 leituras feitas no tacômetro (V_t) e na instrumentação de referência (V_r), calculado segundo a fórmula:

$$e = ((V_t - V_r) / V_r) * 100.$$

Atualmente, o procedimento adotado e os equipamentos usados garantem, com 95% de significância, uma incerteza sistemática dos valores de referência de $\pm 0,7\%$ abaixo de 100 rpm e $\pm 0,10\%$ acima de 100 rpm (inclusive).

A incerteza final é dada pela soma vetorial da incerteza aleatória observada e da incerteza sistemática da referência (calculada anualmente).

Deterioração dos resultados

Conforme visto no estudo estatístico anexo, é possível notar que houve uma deterioração de algum elemento da bancada de calibração nos últimos meses de 1997. As figuras abaixo, visam enfatizar este problema.

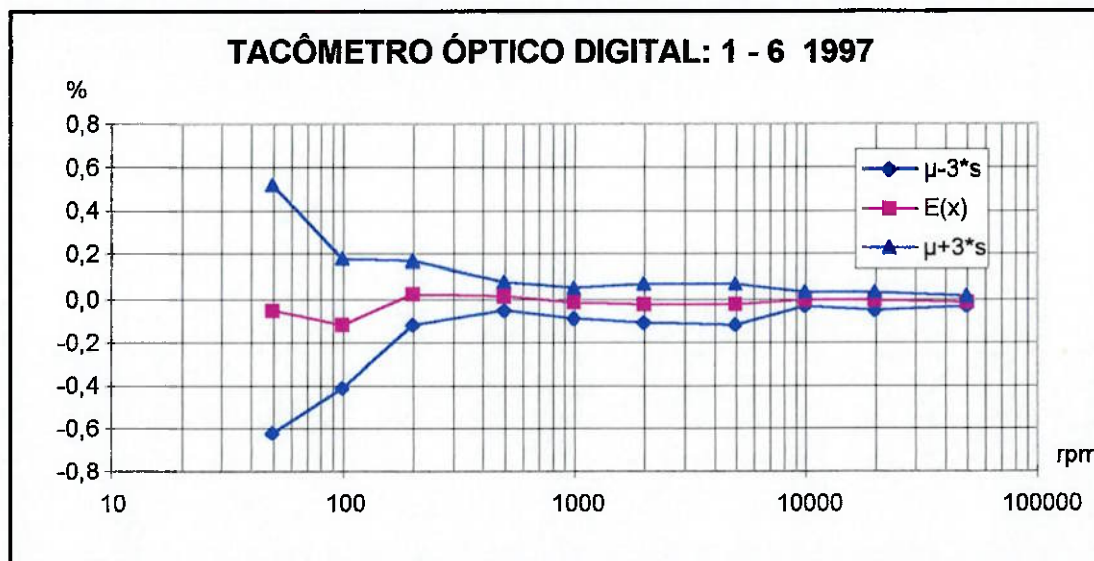


Figura 2 - Distribuição em função da rotação

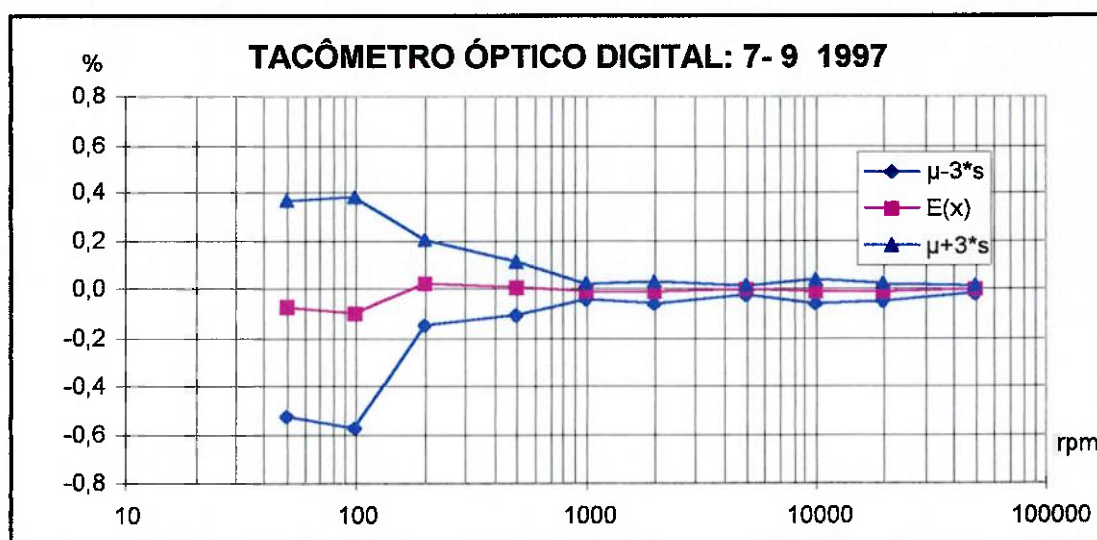


Figura 3 - Distribuição em função da rotação

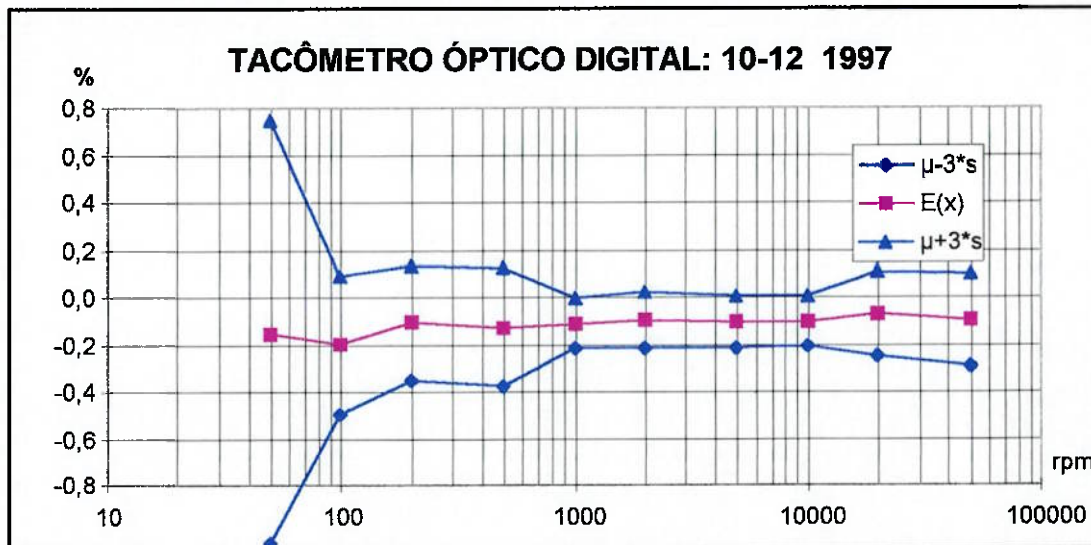


Figura 4 - Distribuição em função da rotação

Maiores explicações se encontram no próprio estudo estatístico. Entretanto, é possível perceber um aumento sensível do erro médio e da dispersão em altas rotações. Isto leva a crer que houve um aumento do erro sistemático e uma diminuição da repetibilidade do sistema, mesmo se os resultados ainda confirmam a incerteza declarada.

Necessidade de reduzir a incerteza dos resultados

Atualmente, o IPT oferece uma incerteza sistemática dos valores de referência de $\pm 0,7\%$ abaixo de 100 rpm e $\pm 0,10\%$ acima de 100 rpm (inclusive). Somando a incerteza aleatória resultante de uma dada calibração específica, obtém-se a incerteza final dos resultados que atingem em geral, por volta de $\pm 0,9\%$ abaixo de 100 rpm e $\pm 0,13\%$ acima de 100 rpm (inclusive). Aumentando o número de amostras, podemos evidentemente diminuir a incerteza. Entretanto, o valor mínimo será a incerteza sistemática dos valores de referência.

Ora, vários clientes expuseram a necessidade de possuir uma calibração com uma incerteza por volta de $\pm 0,5$ rpm até 2000 rpm e ± 2 rpm até 10000 rpm. O que implicaria numa incerteza dos resultados de $\pm 1\%$ abaixo de 100 rpm (em geral, esta incerteza já é satisfeita), de $\pm 0,03\%$ até 2000 rpm e $\pm 0,02\%$ até 10000 rpm. O que implica na necessidade melhorar a incerteza da calibração através de novos equipamentos, mudança no procedimento e/ou nos modelos adotados.

DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo inicial, diagnosticar e identificar as causas da perda de qualidade, melhorar o projeto da bancada de calibração, essencialmente reduzindo a incerteza dos resultados finais e portanto da própria referência e finalmente, melhorar as condições de trabalho do operador, quanto à segurança e higiene do trabalho.

Cronograma e plano de trabalho

Após um intenso estudo bibliográfico sobre incertezas, vibração torcional e procedimentos de calibração, realizou-se um estudo da bancada de calibração concomitante à análise e seleção de novos equipamentos verificando o efeito destes na qualidade da calibração.

Tabela 2 - Cronograma de atividades

Atividade	Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pesquisa Bibliográfica		■	■										
Estudo da bancada			■	■	■	■							
Estudo de novos equipamentos						■	■	■					
Modificação da bancada								■	■				
Verificação do novo comportamento									■	■	■		
Mudanças no procedimento												■	■
Conclusões e relatório													■

Num primeiro tempo, o trabalho consiste na análise dos defeitos de calibração, identificando os motivos da perda de qualidade e as limitações da bancada, fundamentando a necessidades das alterações. Assim, serão selecionados os novos equipamentos. Estes serão testados e seu efeito analisado, viabilizando a modificação definitiva que criará a necessidade de alterações no procedimento e do manual de calibração.

Estudo da bancada:

Verificação do Encoder 1800

Uma das primeiras hipóteses feitas afim de explicar a variação do comportamento estatístico foi a de que teria ocorrido uma deterioração do encoder.

Observando o sinal de saída do encoder 1800 no osciloscópio, percebe-se que a frequência deste varia com o tempo. Isto poderia “enganar” o freqüencímetro que viria a apresentar resultados superiores ao valor verdadeiro.

Afim de verificar se o encoder 1800 apresenta alguma disfunção, efetuou-se a comparação entre uma calibração em três rotações, usando o encoder 1800 como referência e, ao mesmo tempo, usando um pick-up magnético na engrenagem redutora do mesmo eixo (eixo motor) como outra referência. Os resultados são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 3 - Encoder x Pick-up magnético

Referência	Leitura no Tacômetro (rpm)	Valor de referência (rpm)	Erro (%)
Pick up magnético (eixo motor)	200	200,6	-0,3
	500	500,9	-0,2
	1000	1000,9	-0,1
Encoder 1800 (eixo motor)	200	200,5	-0,3
	500	500,9	-0,2
	1000	1001,0	-0,1

Como podemos ver, os dois resultados conferem, mesmo se o sinal dado pelo pick-up magnético possui uma variação muito menor na sua frequência do que o encoder 1800.

Podemos portanto assumir que não há problemas com o encoder 1800.

Admitiu-se então que a variação da frequência observada no osciloscópio se deve à vibração torcional.

Substituição do encoder 1800 por um encoder 360

Admitindo que o problema seja realmente a variação da velocidade de rotação, então se o encoder não fosse capaz de codificar esta variação, eliminaríamos o problema.

Isto motivou a substituição do encoder 1800 por um encoder 360 cuja sensibilidade fica reduzida e portanto poderia “filtrar” o sinal.

Efetuuou-se então a calibração em três rotações de um tacômetro já calibrado com o encoder de 1800 pulsos. Os resultados estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 4 - Encoder 1800 x Encoder 360

Leitura no Tacômetro (rpm)	Valor de referência: Encoder 1800 (rpm)	Valor de referência: Encoder 360 (rpm)	Erro (%) Encoder 1800	Erro (%) Encoder 360
2000	2002,0	2080,9	-0,10	-3,84
5000	5004,9	5044,4	-0,10	-0,84
9000	9008,8	9042,5	-0,08	-0,45

Os erros obtidos pelo encoder 360 mostram uma tendência nitidamente negativa. Na verdade, efetuando mais alguns testes, observa-se que o encoder 360, apresenta erros muito grandes e não possui repetitividade. Verificou-se então que este encoder estava defeituoso e não poderia ser usado.

Mudança de eixo de referência

Uma das limitações da bancada de calibração é que, devido à instrumentação e ao equipamento disponível, a medida da rotação de referência não é feita no mesmo eixo da medida pelo tacômetro.

Assim, afim de verificar se esta discrepância origina algum erro, efetuou-se a calibração de um tacômetro em três rotações usando o encoder 1800 (no eixo motor) como referência e, ao mesmo tempo, usando um pick-up magnético no eixo movido (onde é feita a

leitura com o tacômetro) como outra referência. Os resultados estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 5 - Eixo movido x Eixo motor

Condição	Leitura no Tacômetro (rpm)	Valor de referência (rpm)	Erro (%)
Pick up magnético (eixo movido)	2000	2000,8	-0,04
	5000	5001,4	-0,03
	90002	9001,7	0,00
Encoder 1800 (eixo motor)	2000	2002,0	-0,10
	5000	5004,9	-0,10
	9002	9008,8	-0,08

Como podemos observar na tabela acima, a medida com o encoder 1800 no eixo motor apresenta uma tendência negativa maior do que com o pick-up magnético no eixo movido. De fato, na rotação de 9002 rpm, obtém-se um erro nulo com a referência no eixo movido enquanto que o encoder 1800 fornece um erro de -0,08%. Ou seja, o fato das medidas de referência e do tacômetro não serem feitas no mesmo eixo parece causar uma tendência negativa no resultado final. Entretanto, este efeito não é intrínseco ao sistema, já que apareceu recentemente.

Como a leitura de referência através do encoder apresenta uma tendência negativa em relação ao pick-up magnético, pode-se concluir que a relação tende a atenuar o problema de tendência negativa. Ou seja, a relação parece agir como uma espécie de filtro para as vibrações.

Assim, o distúrbio observado poderia ser explicado pela vibração torcional: o eixo motor apresentaria uma oscilação torcional que levaria a referência a indicar uma frequência maior do que a real. Entretanto, as folgas da correia de transmissão atenuariam o problema no eixo movido, transmitindo menos vibração.

Através de uma lâmpada estroboscópica, foi possível verificar que ocorre esta oscilação torcional no eixo motor.

Esta vibração poderia ter aparecido em função do acoplamento ou do motor. Estes teriam apresentado uma deterioração de suas características.

Substituição do acoplamento.

Com o intuito de eliminar ou reduzir a vibração torcional, projetou-se um novo acoplamento. Este acoplamento transmite o torque através de uma borracha conforme o esquema abaixo:

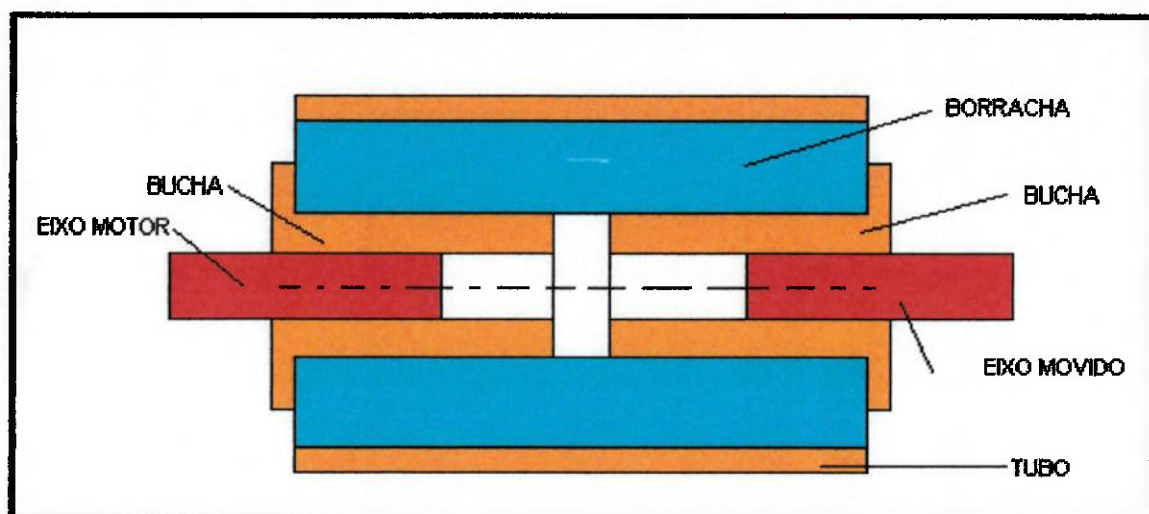


Figura 5 - Acoplamento de borracha

Afim de verificar o efeito do novo acoplamento, calibrou-se cinco tacômetros com este novo acoplamento. Sendo que estes mesmos cinco tacômetros já haviam sido calibrados com o antigo acoplamento. A média e as margens para 62,5% das amostras estão representadas no gráfico abaixo:

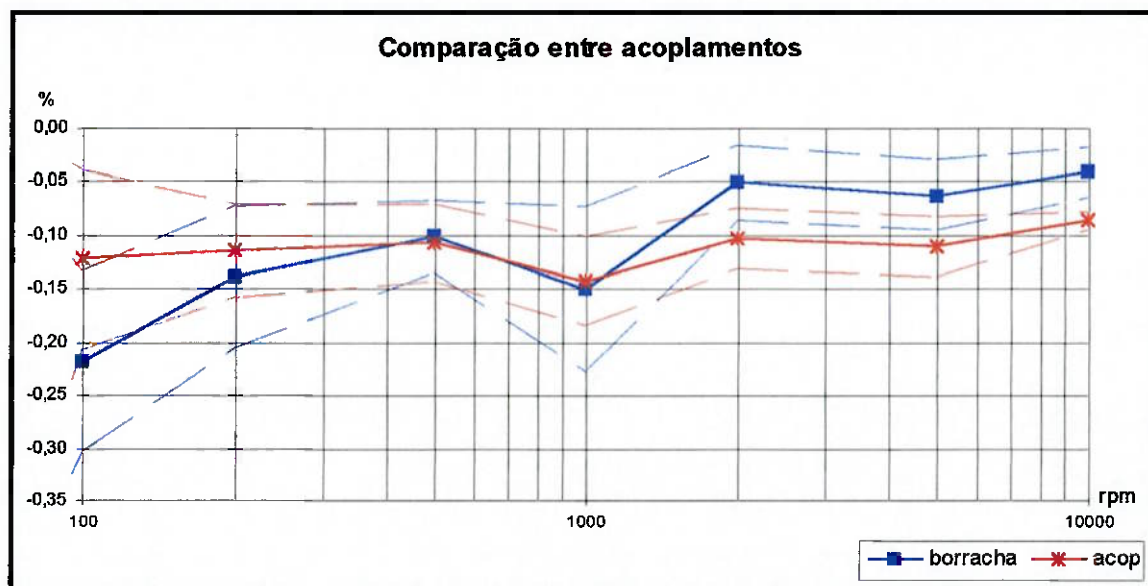


Figura 6 - Média relativa e dispersão relativa dos dois tipos de acoplamentos

Distinguem-se três faixas com comportamentos distintos: de 100 a 500 rpm, onde os resultados dados pelo acoplamento de borracha possuem uma maior tendência negativa do que o acoplamento normal; de 500 a 1000 rpm, onde os dois acoplamentos possuem respostas semelhantes e de 1000 a 10000 rpm, onde o acoplamento de borracha possui uma menor tendência negativa.

Substituição do Freqüencímetro

O freqüencímetro 5306 utilizado na bancada de calibração foi recalibrado e possui um erro de -0.02%. Além disso, ele apresenta uma alta variação no resultado. Assim, este foi substituído pelo freqüencímetro 5315. No gráfico abaixo temos o resultado da calibração de um mesmo tacômetro usando o velho acoplamento, o acoplamento de borracha com o freqüencímetro 5306 e o acoplamento de borracha usando o freqüencímetro 5315.

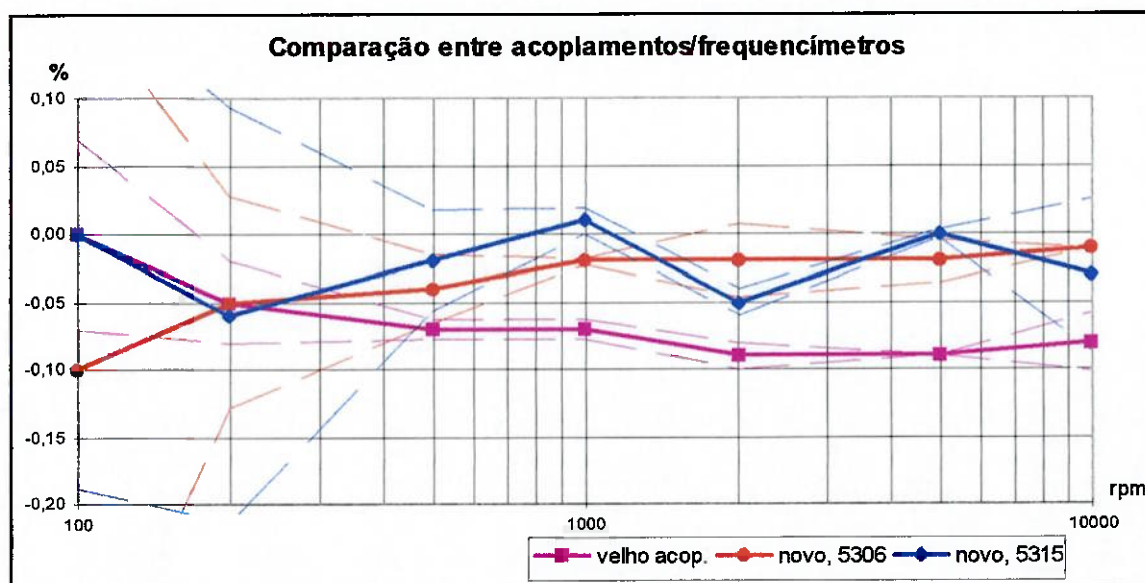


Figura 7 - Calibração com diferentes acoplamentos e freqüencímetros

Apesar da curva com o freqüencímetro 5315 parecer mais descontínua, estatisticamente, os dois resultados são parecidos entre si. Observe que independentemente do freqüencímetro, o novo acoplamento possui uma tendência negativa relativamente menor do que o velho acoplamento.

Note que a variação da saída observada no freqüencímetro 5306 também é observada no freqüencímetro 5315.

Alteração do método de calibração

Como foi visto acima, medir a rotação de referência no mesmo eixo em que é medida a rotação pelo tacômetro seria muito mais correto e tende a diminuir a tendência negativa observada. Isto não pode ser feito pelo encoder devido à grande faixa de rotações à qual o eixo de saída é submetido. A solução seria utilizar o pick-up magnético no eixo de saída. Isto não podia ser feito com o freqüencímetro 5306 pois este não lê freqüências abaixo de 160 Hz. Entretanto, o freqüencímetro 5315 permite leituras de baixa freqüência e viabiliza portanto a leitura no mesmo eixo.

Mesmo mudando a referência de eixo, o valor a ser lido no freqüencímetro ainda apresenta uma variação que dificulta o operador. Uma solução que foi testada aqui, é de

anotar o valor máximo e o valor mínimo observados durante um certo intervalo de tempo. Se a distribuição desta variação for uniforme (o que é amplamente aceitável), a média entre o máximo e o mínimo se aproximaria da média da própria variação observada. Assim sendo, cada leitura deste novo método consiste na média entre o valor máximo e o mínimo observados durante um período de 30 a 40 s. Conseqüentemente, cada leitura deixa de ser dependente do instante em que o operador olha a referência. Entretanto, durante este período o valor lido no tacômetro que está sendo calibrado também pode variar. Embora esta variação seja muito pequena ou mesmo as vezes inexistentes, afim de evitar novas fontes de erro, cada leitura do tacômetro passa a ser o valor médio (aproximado novamente pela média entre o máximo e o mínimo) observado no mesmo período.

Afim de avaliar a eficácia deste método, foram calibrados dois tacômetros: um óptico e um de contato digital. Para cada tacômetro, traçou-se no mesmo gráfico os resultados da calibração com o velho método e os dois tipos de acoplamentos junto com os resultados usando este novo método com o novo acoplamento (de borracha):

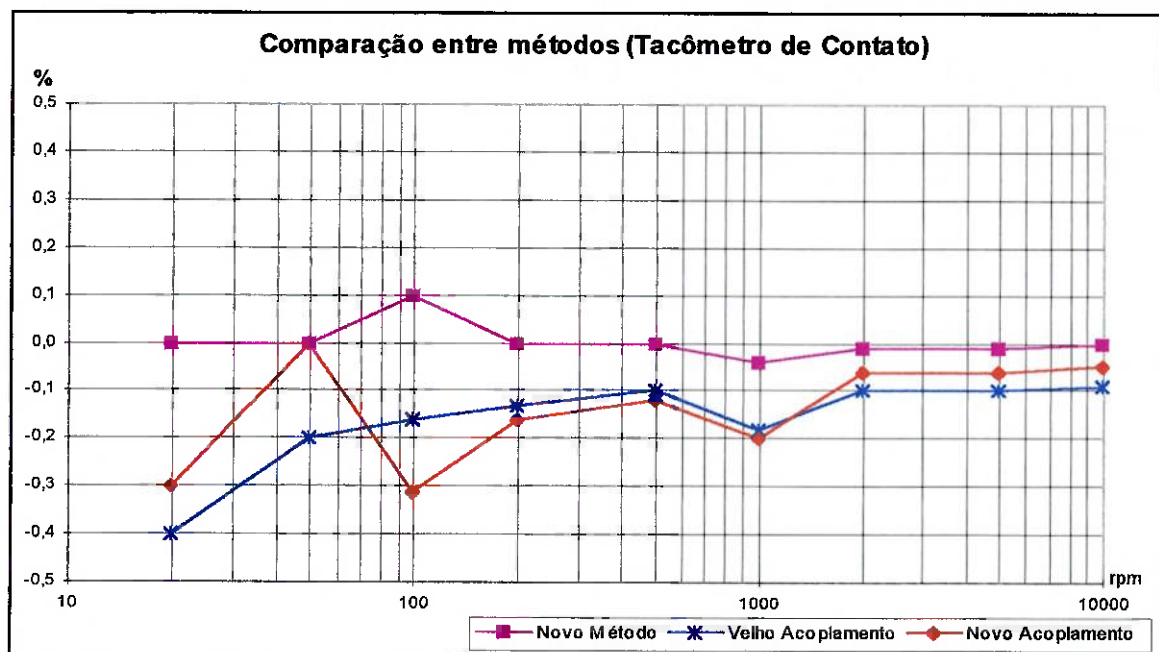


Figura 8 - Calibração com diferentes métodos (Tac. de contato)

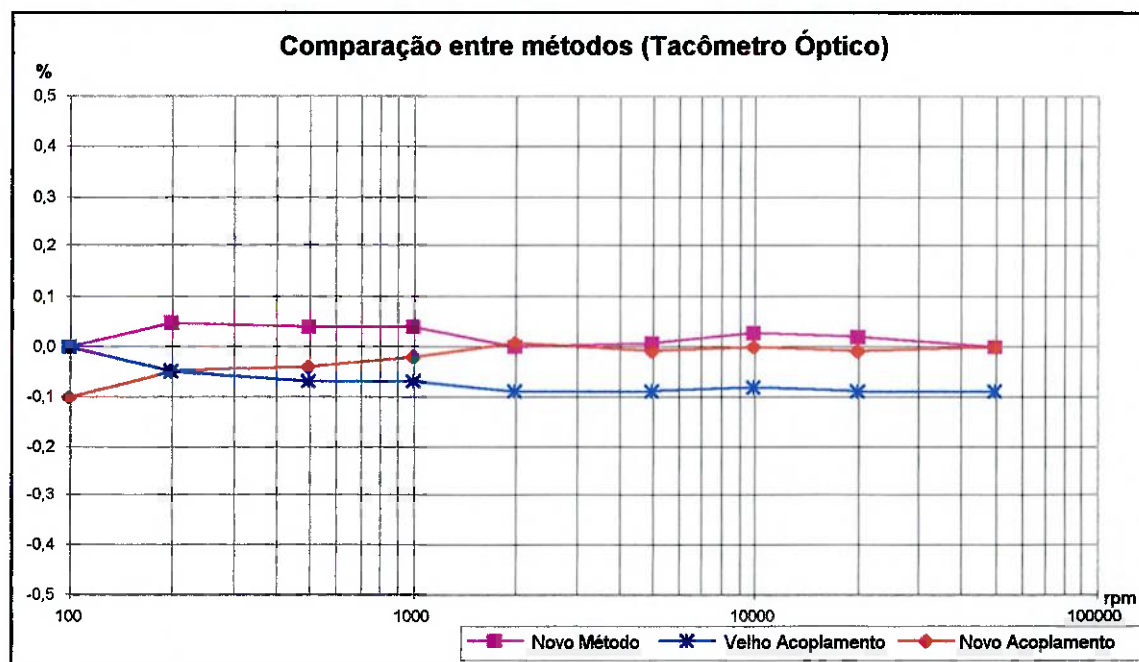


Figura 9 - Calibração com diferentes métodos (Tac. Óptico)

Como podemos observar, este novo método diminui a tendência negativa observada anteriormente. Note ainda que para o tacômetro de contato digital ensaiado, os três resultados apresentam um comportamento semelhante acima de 200 rpm já que as três curvas são, grosso modo, paralelas. Abaixo de 200 rpm, a dispersão é relativamente grande e embora as curvas não parecem semelhantes, os três resultados são estatisticamente equivalentes. Para o tacômetro óptico ensaiado, temos novamente uma diminuição da tendência negativa. O acoplamento de borracha inverte a tendência da distribuição com o aumento da rotação, mudando a concavidade da curva e subindo a assíntota de -0,1 para 0%. Ora, em altas rotações a dispersão relativa diminui consideravelmente (de 0,02 para 0,003 %) provocando um aumento da precisão. Ou seja, o resultado obtido em altas rotações (acima de 5000 rpm) é muito mais significativo e leva a crer que com o novo acoplamento houve efetivamente uma melhora quanto à tendência do sistema. O novo método parece melhorar consideravelmente o resultado médio em baixas rotações e sugere a necessidade de mudança no processo de calibração pelo menos nestas baixas rotações. Sobretudo se considerarmos que a tendência negativa em baixas rotações já havia sido observada na distribuição dos resultados de 1996. O novo método atua igualmente em altas

rotações no sentido de diminuir a tendência negativa. Entretanto, em rotações médias (entre 2000 e 5000 rpm) fica menos evidente o efeito deste.

Se em vez de adotar como valor lido pelo tacômetro a média entre o máximo e o mínimo observado, adotarmos a moda, os resultados melhoram ainda mais.

Análise da vibração torcional

Verificação da ocorrência do fenômeno

Afim de demonstrar a existência da vibração torcional, usou-se o pick-up magnético afim de obter 1 pulso por volta do motor com o auxílio de um pino metálico no eixo de saída do mesmo. Usando o freqüencímetro HP 53131A, obteve-se então a razão entre a saída do encoder e do pick-up magnético. Teoricamente, o resultado deveria ser constante e igual a 1800. Isto por que o encoder fornece 1800 pulsos por volta. Entretanto obteve-se o resultado dado pela tabela abaixo:

Tabela 6 - Relação encoder (1800 pulsos/volta) / pick-up (1 pulso por volta)

Freqüência do encoder (Hz)	Rotação do eixo de saída (rpm)	(Canal1/Canal2) Valor mínimo	(Canal1/Canal2) Valor máximo	% $\frac{(\text{max-min})}{1800}$
Relação: 22/72 (Redutor)				
3848	39	1797	1808	0,61%
4940	50	1797	1807	0,56%
7336	75	1798	1803	0,28%
9985	102	1798	1802	0,22%
14351	146	1799	1802	0,17%
16323	166	1799	1802	0,17%
19365	197	1799	1801	0,11%
49093	500	1800	1800,3	0,03%
98187	1000	1800	1800,3	0,03%
Relação: 72/22 (Multiplicador)				
14413	146,80	1799	1804	0,28%
18771	191,19	1799	1802	0,17%
45815	466,63	1799,7	1801,4	0,09%
49009	499,17	1799,7	1801,0	0,07%
OBS:	Ensaio realizado no dia 27/05/98			

Conforme podemos observar acima, vemos que o encoder não fornece sempre 1800 pulsos por volta. Na verdade, a saída oscila ao redor de 1800 pulsos. Essa oscilação diminui a medida que a frequência aumenta ou seja, a medida que a velocidade de rotação aumenta, e pode ser atribuída à vibração torcional do sistema mecânico.

Medida da vibração torcional

Afim de melhor quantificar a vibração torcional observada, desenvolveu-se um v.i. (ver anexo 2) no LabVIEW que, a partir do contador da própria placa de aquisição do computador, determina a variação do período de um sinal de entrada.

Eixo motor

No caso do eixo motor, o próprio sinal do encoder foi usado como entrada do v.i. . Observou-se então que a frequência varia com grande amplitude assim como o sinal médio.

Tabela 7 - Saída do v.i. com 1 segundo de tempo de aquisição

Rotação de saída (rpm)	Frequência do Encoder (média dos inversos) (Hz)	Frequência do Encoder (Inverso da média) (Hz)	Frequência Máxima do Encoder (Hz)	Frequência Mínima do Encoder (Hz)	Pulsos volta	Amplitude (%)
20	2017	1982	2500	1450	1\12	26,5
51	5021	5005	5450	4450	1\12	10,0
76	7521	7497	8200	6800	1\12	9,3
102	10001	9998	10300	9600	1\12	3,5
153	14999	14999	15200	14850	1\12	1,2
204	20006	20006	20200	19750	1\4	1,1
306	30016	30016	30300	29750	1\3	0,9
611	60038	60036	61200	59000	2	1,8
1019	100106	100086	104000	97000	1	3,5
Condições	Inversor: Newtronic 03/Junho/98					

Eixo movido

Afim de analisar a vibração do eixo movido, foi desenvolvido um sistema de aquisição que fornece ao v.i. 1 pulso por volta do próprio eixo movido. Basicamente, trata-se de um sensor ultravioleta que a cada vez que passa na frente de um pino fixado no eixo movido fornece um pulso elétrico, convertido então em um sinal TTL.

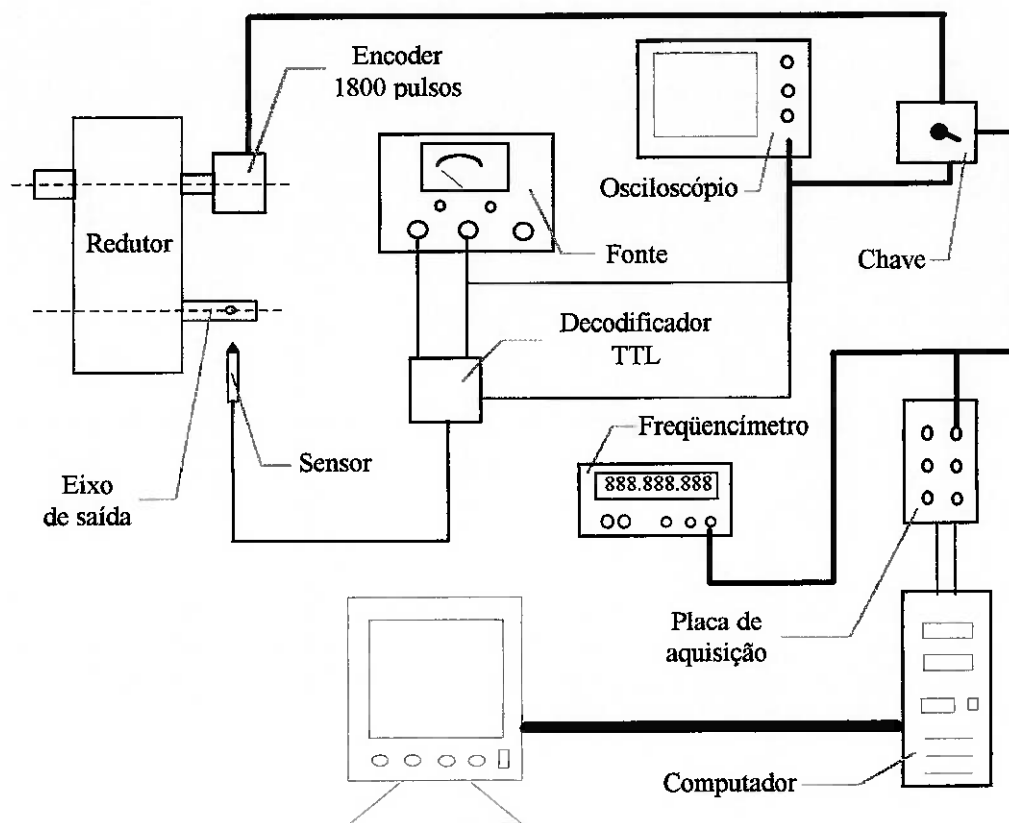


Figura 10 - Sistema de aquisição

Observou-se que a amplitude de oscilação é significativamente menor assim como a variação do valor médio da frequência do sinal.

Identificação e Correção do Defeito da Bancada

Com o intuito de melhorar o controle da rotação do eixo de saída do conjunto Redutor/Multiplicador e de reduzir o nível sonoro ao qual o operador está submetido, foi testado um novo inversor: o Dinverter A da Control techniques. Este inversor permite

alterar a frequência da portadora para uma frequência não audível (no caso 12kHz). Percebeu-se então que havia, na caixa redutora/multiplicadora, um som de impactos, cuja frequência dependia da rotação. Não era possível ouvir esses pequenos choques antes, em virtude do alto nível de ruído devido, essencialmente, à frequência da portadora do antigo inversor.

Com o intuito de averiguar a origem deste defeito, o conjunto redutor/multiplicador foi desmontado e pode-se então observar que a chaveta do eixo motor estava invertida. Isto criava uma folga exagerada e amplificava a vibração torcional natural do sistema. Chegou-se à conclusão de que o problema ocorreu após a troca preditiva dos rolamentos. Afim de poder melhor relacionar futuros problemas, foi criada uma ficha de manutenção da bancada, onde qualquer ensaio ou modificação fica registrado. Após a remontagem correta do conjunto, o ruído sumiu. O anexo 3 apresenta a vibração torcional, no eixo motor, com a chaveta invertida e com a chaveta bem fixa. A tabela abaixo sintetiza alguns resultados.

Tabela 8 - Análise do efeito da chaveta na amplitude de vibração torcional.

Rotação do eixo de saída (rpm)	Frequência do encoder 1800 (Hz)	Pico a Pico Relativo na saída 1 pulso/volta	Pico a Pico Relativo na saída 1 pulso/volta	Pico a Pico Relativo na entrada 1800 pulsos	Pico a Pico Relativo na entrada 1800 pulsos
Condição:	Redutor	Chaveta ruim	Chaveta boa	Chaveta ruim	Chaveta boa
200	19650	0,193 %	0,162 %	3,563 %	2,443%
500	49090	0,170 %	0,142 %	3,055 %	2,242%
1001	98250	0,130 %	0,107 %	3,054 %	2,035%
Condição:	Multiplicador	Chaveta ruim	Chaveta boa	Chaveta ruim	Chaveta boa
2000	18320	0,280 %	0,063 %	3,002 %	1,810 %
5001	45840	0,190 %	0,059 %	2,836 %	1,745 %
10001	91600	0,180 %	0,059 %	3,054 %	1,639 %

A tabela 8, mostra o valor pico a pico relativo de vibração torcional em função da rotação, no eixo de entrada, com 1800 pulsos por volta, e no eixo de saída, com 1 pulso por volta. Na figura abaixo, esses resultados são apresentados na forma de gráfico. Observa-se primeiramente que a chaveta solta amplifica o nível de vibração torcional. Por outro lado, com a chaveta bem fixa, o nível de vibração, além de ser menor, diminui a medida que a rotação aumenta. Note que o valor de pico a pico é muito menor no caso do eixo de saída, onde a aquisição é de um pulso por volta, do que no eixo de entrada, onde a aquisição é de 1800 pulsos por volta. Já havia sido observado que a vibração torcional é maior no eixo de entrada do conjunto redutor/multiplicador do que no eixo de saída. Entretanto a diferença não é significativa a ponto de justificar tal discrepância. Comparando as medidas de vibração torcional, feitas no eixo de entrada, com 1 pulso por volta e com 1800 pulsos por volta (anexo 4), observa-se que a menor discretização parece “filtrar” a vibração torcional. Na verdade, o encoder de 1800 pulsos por volta mostra-se mais sensível por ser capaz de perceber oscilações de menor período e/ou de menor amplitude. Já, aquisitando um único pulso por volta, obtém-se um valor médio relacionado não mais à vibração instantânea mas à vibração observada a cada volta.

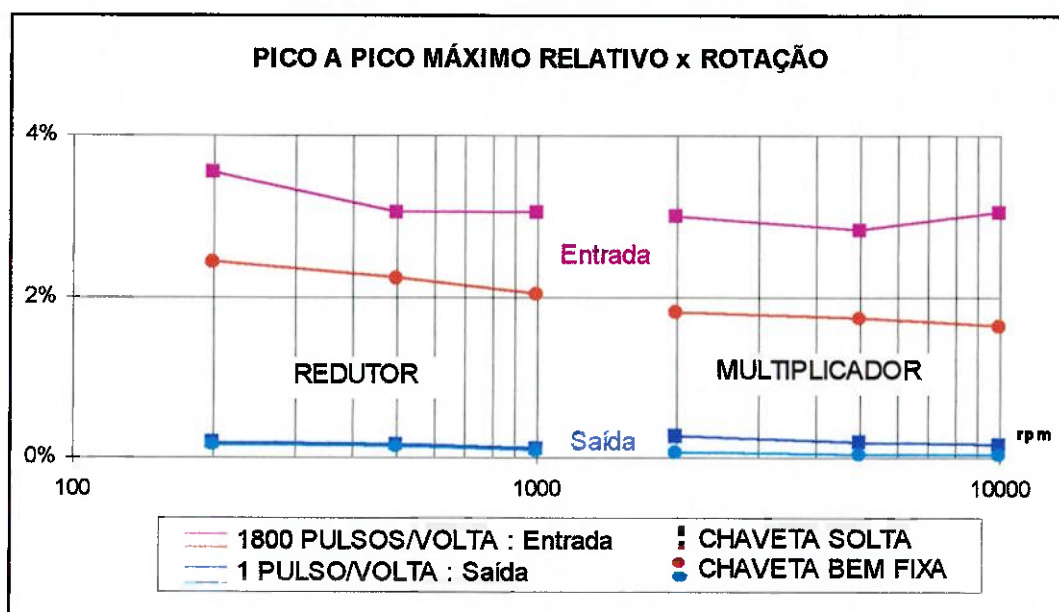


Figura 11 - Análise do efeito da chaveta na amplitude de vibração torcional.

A figura 12, apresenta a distribuição dos resultados das calibrações de tacômetros de contato, observada após a inversão da chave. No anexo 5, são apresentados a distribuição para os demais tipos de tacômetros. Observa-se que o comportamento voltou ao normal, com uma tendência relativamente desprezível, e uma dispersão decrescente com o aumento da rotação.

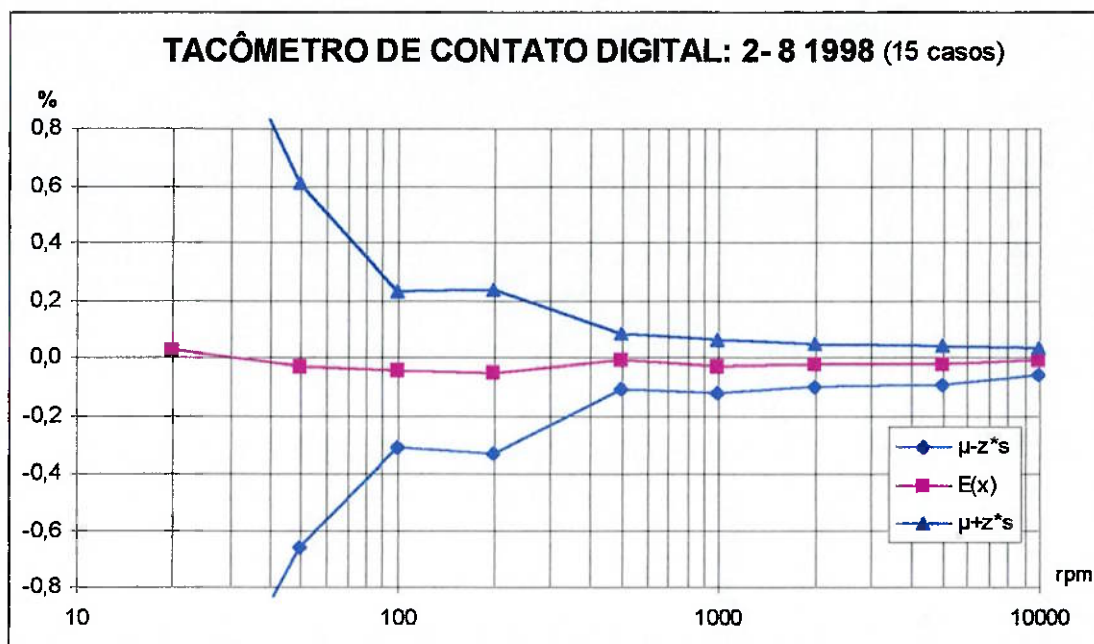


Figura 12 - Distribuição dos resultados da calibração após a inversão da chave.

Escolha do inversor

DINVERTER A

O inversor DINVERTER A pode ser usado com controle analógico, digital via teclado próprio ou ainda digital via entrada de comunicação serial. Os dois primeiros foram testados. Temos abaixo as ligações necessárias para cada tipo de controle usado. A grande vantagem do DINVERTER A é o fato de poder controlar a frequência da onda portadora, reduzindo portanto o nível de ruído ao qual o operador está submetido. O modo terminal é o

modo com controle analógico de velocidade. Na figura abaixo, temos as ligações necessárias a este controle.

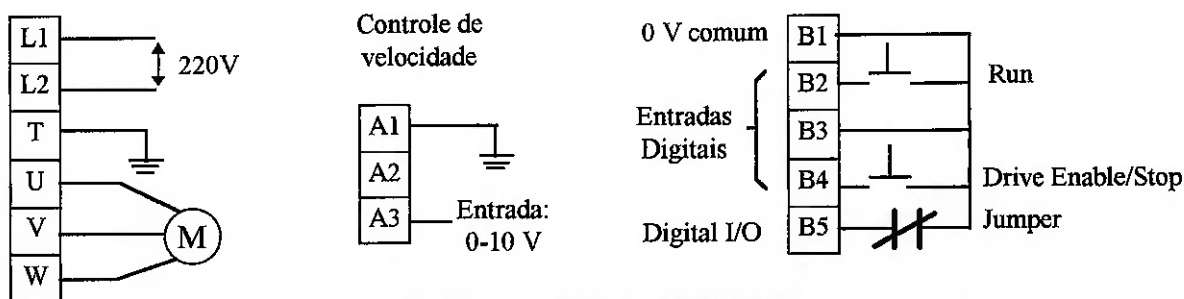


Figura 13 - MODO TERMINAL

No modo digital, o controle é feito através de um teclado próprio do inversor.

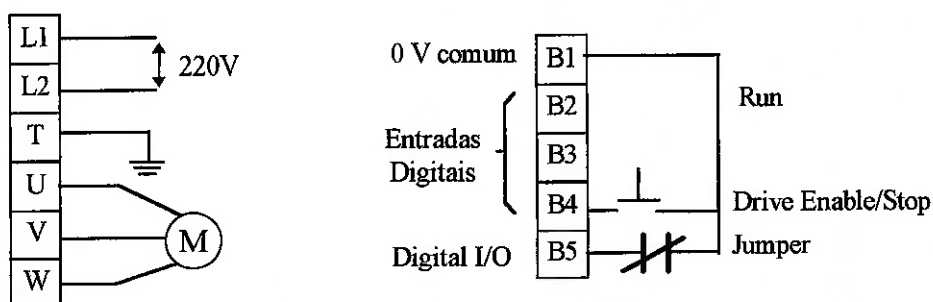


Figura 14 - MODO DIGITAL

O valor dos parâmetros de programação do inversor DINVERTER A, para cada tipo de controle, estão relacionados no anexo 6.

NEWTRONIC FVR

O Inversor NEWTRONIC FVR possui apenas um controle analógico de velocidade e não permite regular a frequência da portadora. Além disso, o NEWTRONIC FVR, por não ser programável, não permite ao usuário definir as condições de aceleração e desaceleração. Ou seja, a única função que este inversor pode executar é gerar uma onda

com uma frequência determinada. A figura abaixo mostra as ligações necessárias ao uso deste inversor .

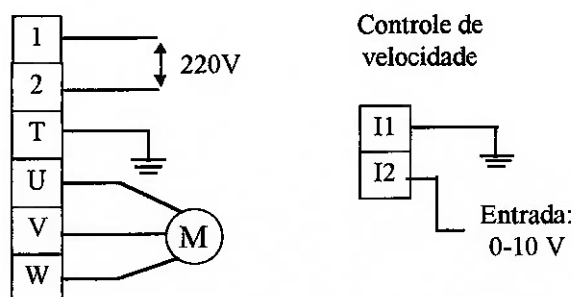


Figura 15 - Ligações do NEWTRONIC FVR

COMPARAÇÃO QUANTO AO DESEMPENHO

Apesar do DINVERTER A possuir uma serie de vantagens em relação ao NEWTRONIC FVR, o objetivo principal de todo este estudo é reduzir a incerteza da referência, melhorando a qualidade do sistema de calibração de tacômetros. Ora, sabe-se que a flutuação da velocidade de rotação é o fator preponderante na incerteza final do sistema. Assim, devemos optar pelo Inversor que possui o menor nível de flutuação possível. Para tanto, fez-se o levantamento da flutuação média de velocidade de rotação e foi aqisitada a variação instantânea da frequência fornecida pelo encoder 1800. A flutuação média é decisiva pois esta deverá ser levada em conta no cálculo da incerteza final. A variação instantânea foi aqisitada apenas para ilustrar como o comportamento instantâneo se reflete na flutuação média e afim de verificar que uma maior flutuação média corresponde a um sinal instantâneo mais instável.

A medida da flutuação foi estimada, neste caso, pela diferença entre a maior e a menor medida feita pelo freqüencímetro durante 60s com um Gate Time de 1s, dividida pela média das 60 aquisições. As tabelas abaixo apresentam o resultado obtido para cada inversor.

Conforme podemos observar, o inversor NEWTRONIC FVR fornece uma rotação bem mais estável, com uma flutuação no mínimo 3 vezes menor do que a flutuação obtida com o inversor DINVERTER A. Em baixas rotações, a flutuação obtida com o DINVERTER A atinge níveis inaceitáveis. Logo, podemos concluir que a melhor escolha é o inversor NEWTRONIC FVR. A figura abaixo ilustra esses resultados. Observe que a descontinuidade observada em 2000 rpm se deve à mudança de relação.

Tabela 9 - Flutuação da Rotação com o inversor DINVERTER A

Velocidade (rpm)	Média (Hz)	Máximo (Hz)	Mínimo (Hz)	Flutuação (%)
Redução				
50	4915,3	5023,9	4844,0	3,66%
100	9842,7	9913,6	9762,8	1,53%
200	19947,4	20081,8	19947,4	0,67%
500	49106,4	49197,3	49040,9	0,32%
1000	98165,7	98257,7	98101,9	0,16%
Multiplicação				
2000	18400,2	18485,9	18329,8	0,85%
5000	45901,4	46091,4	45803,4	0,63%
10000	91686,3	91743,9	91625,5	0,13%
Obs:	16/Out, 1 aquisição/s, 60 aquisições			

Tabela 10 - Flutuação da Rotação com o inversor NEWTRONIC FVR

Velocidade (rpm)	Média (Hz)	Máximo (Hz)	Mínimo (Hz)	Flutuação (%)
Redução				
50	4645	4950,3	4939,3	0,24%
100	9833,4	9839,4	9827,3	0,12%
200	19664,8	19669,9	19660	0,05%
500	49048,1	49052,8	49043,1	0,02%
1000	98175,1	98180,1	98170,1	0,01%
Multiplicação				
2000	18334,7	18342,3	18329,8	0,07%
5000	45813,6	45820,3	45810,2	0,02%
10000	91667	91685,3	91648,5	0,04%
Obs:	16/Out, 1 aquisição/s, 60 aquisições			

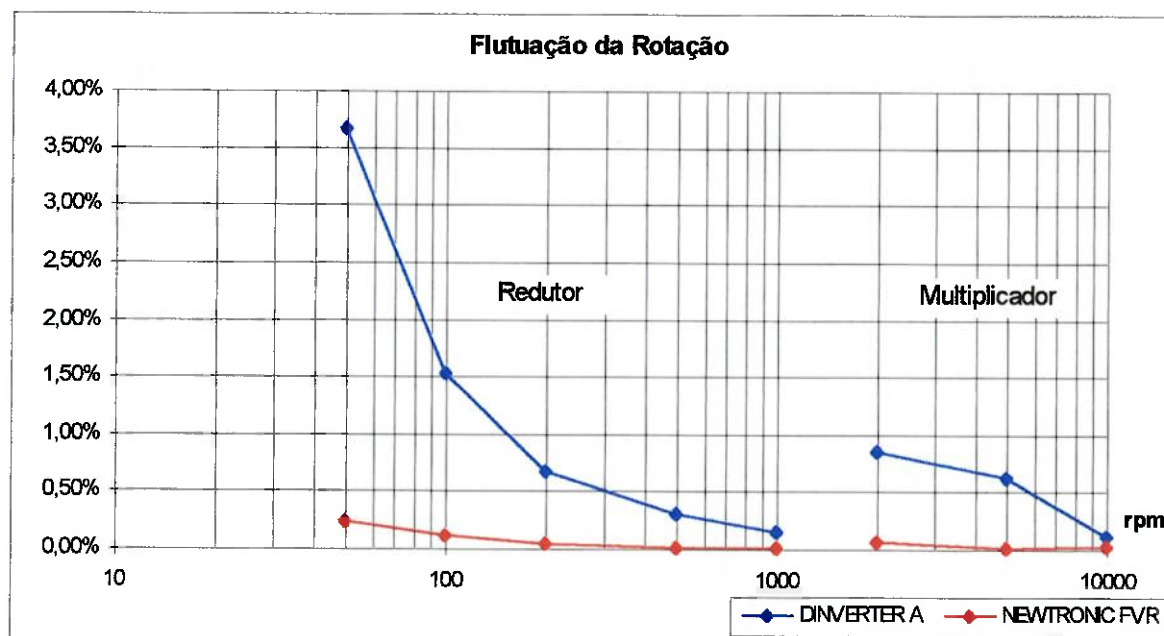


Figura 16 - Flutuação da rotação observada com os diferentes inversores.

O sinal instantâneo fornecido pelo encoder também é mais estável no caso do inversor NEWTRONIC FVR, conforme podemos observar abaixo para uma rotação de 2000 rpm.

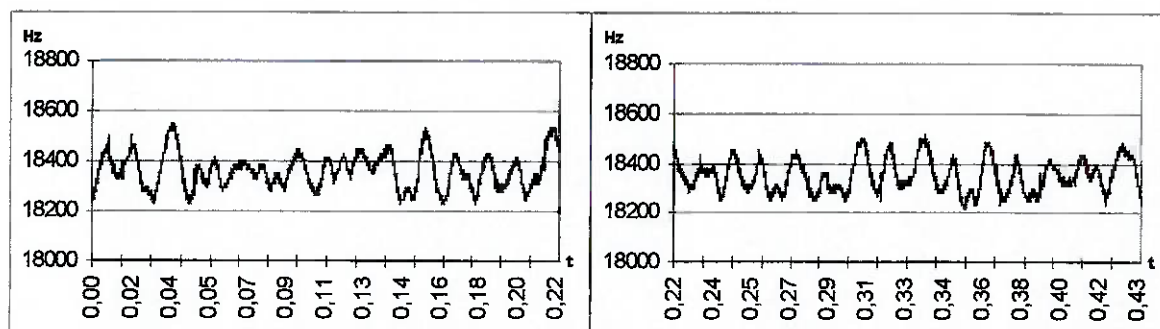


Figura 17 - Sinal com o NEWTRONIC FVR a 2000 rpm

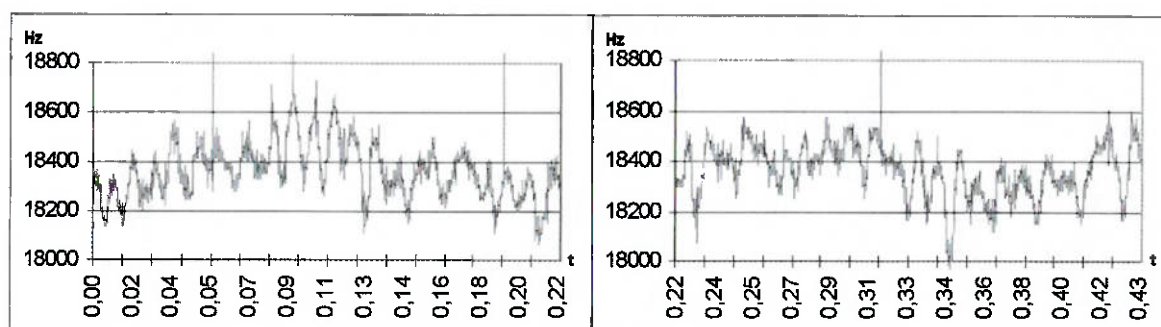


Figura 18 - Sinal com o DINVERTER-A a 2000 rpm

Controle via GPIB

Afim de melhorar a resolução da velocidade de rotação e de facilitar a “sintonia” do tacômetro em calibração, desenvolveu-se um controle via GPIB da velocidade de rotação. O anexo 7 apresenta uma descrição sucinta deste projeto. Basicamente, a placa fornece uma tensão DC entre 0 e 2,5 V. Esta tensão é amplificada através de um circuito não inversor com um amplificador operacional e fornecida como entrada do inversor, substituindo assim

o potenciômetro. A leitura é então feita pelo Contador Universal que transmite a informação ao computador.

Com o auxílio do controle via computador, eliminou-se a transferência manual dos dados, reduzindo portanto a probabilidade de erros. Além disso, o tempo de ajuste foi reduzido drasticamente e a resolução passou de 40 Hz a uma resolução praticamente contínua. Por outro lado, o procedimento automatizado facilita o processo de calibração e reduz a necessidade de treinamento. Note que a placa GPIB não foi utilizada para a aquisição, deixando a cargo do freqüencímetro, em virtude deste último apresentar menor incerteza e, sobretudo, pelo fato de que com esta solução, o computador ainda pode ser dispensado caso ocorra algum defeito, deixando a bancada mais versátil. Observou-se ainda que o controle através de uma tensão aplicada no inversor é mais estável do que com o potenciômetro.

Posição do Inversor

Observou-se que o inversor estava sujeito a um nível considerável de vibração. Afim de quantificar o problema, de maneira a verificar a necessidade de mudar a posição do inversor, mediu-se o nível de vibração ao qual este estava submetido. A medição foi efetuada diretamente sobre a placa de circuito do inversor com o auxílio de um par acelerômetro/amplificador e um multímetro digital para medir a tensão de saída do par casado. As medições foram efetuadas com a relação de redução e de multiplicação. A figura abaixo sintetiza os resultados obtidos.

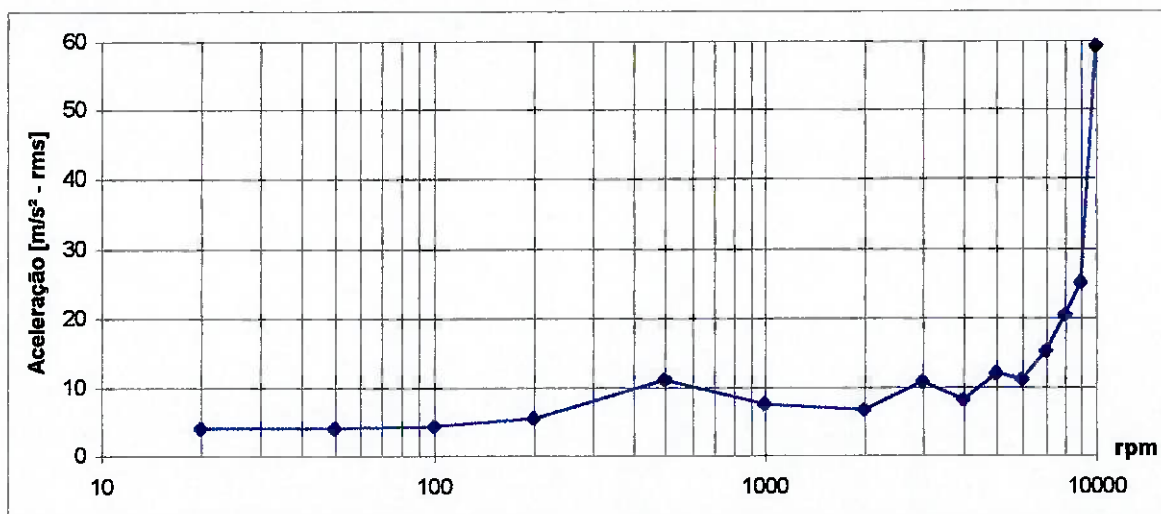


Figura 19 - Nível de vibração do inversor em função da rotação.

Conforme podemos observar, o nível de vibração se mantém aceitável até a velocidade de rotação de 6000 rpm. Acima desta rotação, o nível de vibração atinge rapidamente níveis inaceitáveis. Na rotação máxima de calibração (10.000 rpm) atinge-se por volta de 6 g, o que poderia facilmente provocar um defeito no inversor.

Observou-se que este problema ocorre pois 10.000 rpm corresponde à frequência de ressonância da fixação do inversor. Uma solução para este problema seria tentar modificar a frequência natural do sistema. Isto poderia ser feito modificando a massa ou a rigidez do sistema. Entretanto, não é interessante aumentar a massa pois a frequência natural seria reduzida e o problema persistiria nas rotações mais baixas. Aumentando a rigidez, a frequência natural aumentaria, e cairia fora da faixa de operação. Entretanto, optou-se por simplesmente mudar o inversor de posição. Na nova posição, o inversor não está sujeito a vibrações maiores do que 1g (rms).

Cálculo da Incerteza

A **Incerteza dos Resultados** (I_{res}), é uma combinação da **Incerteza Aleatória** (I_{al}), observada numa dada calibração, com a **Incerteza da Referência**.

$$I_{res} = \pm \sqrt{I_{al}^2 + I_{ref}^2} \dots\dots\dots [1.]$$

A Incerteza Aleatória é estimada com base na dispersão dos resultados obtidos numa dada calibração, conforme a fórmula abaixo:

$$I_{al} = \pm \frac{t_{95,4}}{k} \sum_{j=1}^n \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{z_{ij}^2}{n * (n-1)}} \dots\dots\dots [2.]$$

- Onde: z_{ij} são os desvios percentuais das leituras com relação à média
 I_{al} é a incerteza aleatória das medidas, em porcentagem do valor nominal;
 $t_{95,4}$ é o valor tabelado da distribuição "t" de Student, para um nível de confiança de 95% e $(n-1)$ graus de liberdade;
 n é o número de repetições para cada valor nominal (adotado $n = 5$);
 k é o número de valores nominais estabelecido para cada uma das faixas de incerteza.

Levando em consideração todas as alterações feitas na bancada de calibração de tacômetros, criou-se um modelo para o cálculo da Incerteza da referência. O modelo adotado parte do princípio de que é necessário considerar a incerteza em cada trecho do sistema desde a saída do Conjunto redutor/multiplicador até a leitura final do valor de referência. Para o cálculo da incerteza da referência, foi preciso instalar um encoder no eixo de saída, de maneira a poder estimar a perda ocorrida na passagem de eixos. No anexo 8 são apresentadas todas as planilhas de cálculo necessárias à determinação da incerteza da referência.

Assim sendo, a incerteza da referência é calculada a partir da seguinte fórmula:

$$I_{ref} = \pm \left\{ \left(\frac{e_i}{i} \right)^2 + \left(\frac{e_f}{f} \right)^2 + \left(\frac{e_m}{m} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots [3.]$$

O cálculo de cada parcela está discriminado a seguir:

- $\frac{e_i}{i}$ (Eixos) corresponde à incerteza devido à passagem de eixos.

$$\left(\frac{e_i}{i}\right) = \pm \sqrt{\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{e_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{e_{ib}}{ib}\right)^2} \dots\dots\dots [4.]$$

Onde: $\left(\frac{e_b}{b}\right)$ é a tendência (bias) entre os dois eixos. Existem aqui duas possibilidades:

corrigir a velocidade de rotação com o bias medido ou inseri-lo como parte da incerteza. Como esta tendência é de segunda ordem, optou-se por inseri-la na incerteza da passagem de eixos conforme podemos notar nas fórmulas. Este bias é calculado através da seguinte fórmula:

$$\left(\frac{e_b}{b}\right) = \frac{\sum_{i=1}^l ms_i - \sum_{i=1}^l me_i}{\sum_{i=1}^l ms_i} \dots\dots\dots [5.]$$

Sendo: ms_i uma leitura no eixo de saída, correspondente à média de 10 (no caso do Gate Time de 5 s) ou 20 aquisições com o Contador Universal, com um Gate Time igual a 5, 2 ou 1 s respectivamente em 50, 100 ou acima de 100 rpm.

mse_i uma leitura no eixo de entrada, nas mesmas condições que ms_i .

l o número de leituras; no caso, igual a 5.

$\left(\frac{e_{ib}}{ib}\right)$ é a incerteza aleatória do erro médio entre os dois eixos, calculado por:

$$\left(\frac{e_{ib}}{ib}\right) = \pm t_{95,4} \left(\frac{\sum_{i=1}^l er_i^2}{n(n-1)} \right)^{1/2} \dots\dots\dots [6.]$$

Sendo: er_i Os desvios em relação à média aritmética dos erros em série, ou seja:

$$er_i = \left[\frac{me_i - ms_i}{ms_i} - \sum_{i=1}^l \frac{me_i - ms_i}{ms_i} \right] \dots\dots\dots [7.]$$

- $\frac{e_f}{f}$ (Flutuação) é a flutuação da velocidade no eixo de saída, considerada ruído.

$$\left(\frac{e_f}{f}\right) = \pm t_{95,4} \frac{\left(\sum_{i=1}^l \left(ms_i - \frac{\sum_{i=1}^l ms_i}{l} \right)^2\right)^{1/2}}{\frac{\sum_{i=1}^l ms_i}{l}} \dots\dots\dots[8.]$$

- $\frac{e_m}{m}$ (Medidor) é a incerteza devido ao sistema de medição.

$$\left(\frac{e_m}{m}\right) = \pm MAX(\gamma, \varphi) \dots\dots\dots[9.]$$

Sendo γ representando a incerteza tirada da calibração dos medidores e φ a incerteza mínima do medidor, calculada a partir do modelo fornecido pelo fabricante.

Efetuando-se as operações acima, estimou-se a incerteza da referência para cada rotação. A tabela abaixo sintetiza os resultados.

Tabela 11 - Incerteza da referência em função da rotação.

Rotação (rpm)	$\frac{e_i}{i}$ (%)	$\frac{e_f}{f}$ (%)	$\frac{e_m}{m}$ (%)	Incerteza da referência (%)
20	0,5	0,5	0,001	0,8
50	0,07	0,13	0,001	0,15
100	0,05	0,05	0,001	0,07
200	0,015	0,024	0,001	0,03
500	0,006	0,009	0,001	0,011
1000	0,006	0,0023	0,001	0,006
2000	0,020	0,013	0,001	0,024
5000	0,005	0,006	0,001	0,008
7000	0,004	0,0022	0,001	0,005

A incerteza obtida está de acordo com os requisitos desejados no início deste estudo. Observa-se, por outro lado, que a incerteza cai a medida que a rotação aumenta. Note que a

descontinuidade em 2000 rpm ocorre em virtude da mudança de relação. Ao nível de apresentação nos certificados, definiu-se três faixas de incerteza: 0,03% acima de 200 rpm (inclusive); 0,15 % acima de 50 rpm (inclusive) e 0,8 % acima de 20 rpm (inclusive). Estas faixas são conservadoras pois maiores do que a incerteza real na maioria dos casos. Entretanto não há grande vantagem em fornecer uma incerteza pontual pois isto dificultaria o entendimento do cliente.

Conclusões

O estudo da bancada de calibração de tacômetros permitiu avaliar o efeito de diversos componentes no desempenho final da bancada. Temos agora uma alta resolução acompanhada de uma incerteza reduzida. O tempo de calibração (é necessário apenas a metade do tempo outrora requerido), assim como a probabilidade de erros no produto final (no caso: o certificado) foram drasticamente reduzidos. Por outro lado, a segurança do operador foi aumentada. Os objetivos iniciais do estudo foram portanto alcançadas.

Anexos

ANEXO I

Calibração de Instrumentos de Medida de Velocidade de Rotação - Análise Estatística dos Resultados

Introdução

Há aproximadamente 10 anos, o LEDV executa calibrações de instrumentos de medida de velocidade de rotação, mais conhecidos como tacômetros. Fruto do aumento do número de empresas buscando certificações de qualidade pela série de normas ISO 9000, a procura pelos serviços de calibração tem crescido, nos últimos cinco anos, em taxas consideráveis. O LEDV executou de 93 a 97, 340 calibrações, o que oferece um volume de informações considerável para um estudo estatístico.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento e a análise estatística dos resultados das calibrações dos tacômetros realizadas no período de 1996 a 1997, num total de 150 tacômetros calibrados.

O escopo deste trabalho se restringe aos tacômetros manuais portáteis, que são os mais utilizados na indústria em geral e correspondem a mais de 95% dos serviços de calibração realizados.

Objetivos

Este estudo estatístico consiste em dois períodos referentes aos dados coletados no ano de 1996 e 1997 respectivamente, sendo que os dados de 1997 foram subdivididos em 3 períodos de 4 meses. Os objetivos do estudo estão sucintamente relacionados a seguir:

- Verificação de tendência (erro sistemático) nos valores de referência;
- Verificação da aderência dos modelos adotados:
 - No cálculo dos erros, considerados proporcionais à velocidade de rotação.
 - No cálculo das incertezas, que admite o modelo Gaussiano para a distribuição dos erros.
- Comparação dos resultados:
 - Entre os diferentes tipos de tacômetros (ópticos, de contato, e com as duas funções)

- Entre os diferentes fabricantes.

Descrição sumária do processo de calibração

Basicamente, a calibração consiste, para uma dada velocidade de um eixo rotativo, na comparação da indicação desta velocidade pelo tacômetro e pela instrumentação de referência. Esta comparação é feita através do erro percentual de leitura do tacômetro, calculado como a diferença entre as duas leituras (erro absoluto), dividido pela leitura na referência.

Os valores de referência são tomados como a média aritmética de três leituras para um mesmo valor ajustado através da leitura no tacômetro.

As incertezas são calculadas com base nas médias dos desvios padrões dessas três leituras, também apresentadas na forma percentual.

A calibração é feita para valores (em RPM) dentro da faixa de leitura dos tacômetros e dentro dos limites do sistema de calibração (20 a 10.000 RPM, para tacômetros de contato mecânico, e 20 a 50.000 RPM para tacômetros de leitura óptica). Os valores de velocidade são escolhidos segundo uma distribuição por terço de oitava. Para alguns tacômetros de escalas selecionáveis, a distribuição é feita de acordo a própria escala.

A Figura I.1 abaixo ilustra o processo de calibração.

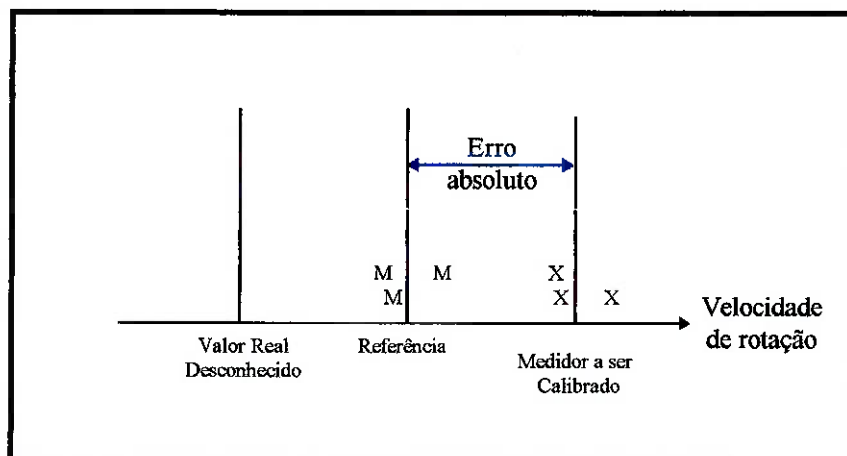


Figura I.1: Calibração de um tacômetro

Fundamentos Teóricos

Valor Verdadeiro

Do ponto de vista da teoria de erros, admite-se que existe um valor verdadeiro bem determinado para toda grandeza física.

O objetivo final de um processo de medida é, evidentemente determinar o valor verdadeiro. Por isso este valor é também chamado de valor alvo.

A questão acima é mais complicada do que parece já que o valor verdadeiro exato de uma grandeza será sempre desconhecido: Independentemente dos métodos usados e dos instrumentos adotados, o valor medido sempre estará sujeito a erros de medida.

Hipótese da Distribuição Gaussiana² de Erros

Se y_v for o valor verdadeiro de uma grandeza e y um valor experimental, o erro é dado por:

$$\eta = y - y_v$$

Como y_v é desconhecido, η também o é, e o erro só pode ser analisado estatisticamente.

Geralmente, um erro η possui várias causas e pode portanto ser escrito como a soma de n erros elementares:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_n$$

Sendo que os erros η_i possuem distribuições diversas de probabilidade tais como Poisson, Retangular, triangular e outras.

Entretanto, demonstra-se que a soma de muitos erros elementares η_i que têm distribuições quaisquer com variâncias finitas, tende a ter uma distribuição Gaussiana.

Ou seja, podemos admitir que a distribuição de erros η tende a ser Gaussiana sem muita perda de generalidade.

A distribuição Gaussiana de erros é definida pela função de densidade de probabilidade dada por:

$$G(y) = 1/(2\pi\sigma^2)^{1/2} \exp(-1/2 (y-\mu/\sigma)^2)$$

Onde $\mu = y_{mv}$ é o valor médio verdadeiro e σ o desvio padrão

Erros Randômicos, Erros Sistemáticos e Pontos fora da Curva

Os erros randômicos ou estatísticos descrevem as pequenas diferenças nas leituras de um instrumento quando uma mesma leitura for efetuada várias vezes. Numa amostra numerosa, os erros negativos são balanceados por erros positivos e a distribuição tende a ser Gaussiana (ver item anterior). Erros de leitura (paralaxe) ou ruídos elétricos são exemplos típicos de erros randômicos. Este tipo de erro é fácil de controlar através do tamanho da amostra.

Os erros sistemáticos descrevem os erros de leitura de um instrumento que não podem ser eliminados por repetições sucessivas da mesma medida. As duas maiores fontes de erros sistemáticos são os distúrbios no sistema durante a medida e o efeito da variação das entradas¹.

Existem alguns erros que são devidos a equipamentos defeituosos e/ou erros de operação. Estes erros devem ser excluídos de todo estudo estatísticos pois são pontos invalidados por disfunção anormal. Afim de determinar estes erros humanos ou de malfuncionamento dos instrumentos pode-se usar o método de GRUBB³ que consiste em calcular o valor:

$$T_{cal} = |X_e - \mu| / (\sum_{i=1,n} (X_i - \mu)^2 / n)^{1/2}$$

Se o valor de T_{cal} for maior do que o valor T_G tabelado para um certo nível de significância, então o ponto deve ser excluído.

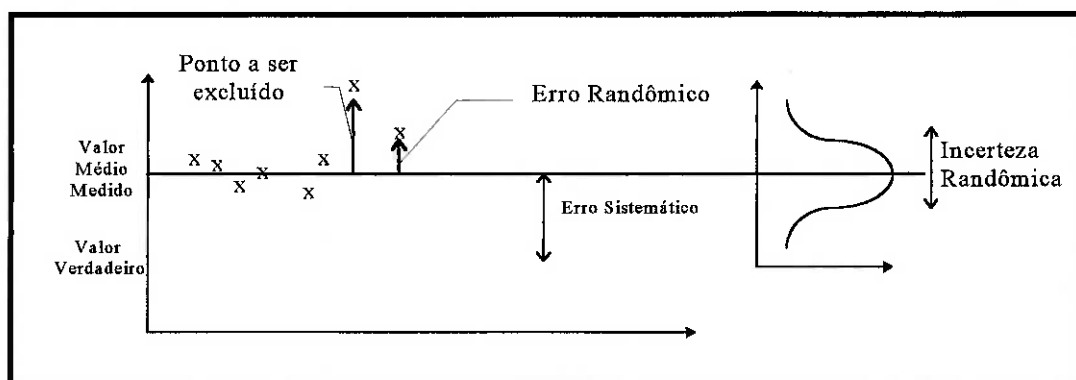


Figura I.2: Tipos de Erro

Coeficiente de PEARSON

O coeficiente de correlação do momento do produto Pearson, r , é um índice sem dimensão situado entre -1,0 e 1,0 inclusive, que reflete a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. O coeficiente é dado por:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Metodologia

Obtenção dos Dados

A partir dos registros (planilhas eletrônicas) das calibrações obtém-se os valores lidos da referência e do tacômetro calibrado (média de três medidas) para cada velocidade de rotação.

- Com base nas leituras do Tacômetro e da Referência, são automaticamente calculados os erros absolutos (diferença algébrica entre calibrado e referência), e relativos (diferença percentual).
- Os pontos fora da curva são eliminados através do método de GRUBB (ver anexo).
- Os erros são então classificados segundo vários critérios: rotação, tipo (de contato, óptico ou híbrido) e marcas. Note que apenas as principais marcas foram discriminadas sendo que as demais foram consideradas conjuntamente através de uma categoria chamada “Outros”. Note ainda que os tacômetros que não apresentam uma distribuição de rotação normal (ver item: Descrição sumária do processo de calibração) não foram considerados neste estudo estatístico.

Estudo Estatístico

Através da planilha eletrônica são calculados os seguintes resultados:

- Média simples dos erros: Refere-se à tendência (BIAS) dos erros.
- Desvio padrão da distribuição de erros: Mede a dispersão dos erros em relação à média.
- Intervalo de confiança para a média usando 95% de significância (ajustável).
- Erros máximos observados (em módulo).

- Correlação dos Erros Máximos e Médios e dos Desvios Padrão em função da rotação.
- Média do módulo dos erros: Sendo esta, outra forma de avaliar o erro esperado de um tacômetro.
- Teste de Kolmogorov-Sminov, afim de verificar se a hipótese de distribuição normal é aceitável.
- Curtose e Distorção da distribuição: Para avaliar o quanto a distribuição difere da curva Gaussiana.
- Com os valores obtidos nos cálculos acima foram traçados os seguintes gráficos, em valores absolutos(rpm) e relativos (%): Erro médio x Rotação, Erro máximo x Rotação, Desvio Padrão x Rotação, Erro médio (relativo ou não) $\pm 3 \times$ Desvio padrão x Rotação, Intervalo de confiança para a média x rotação, etc.

Os dados de 1997 foram divididos em três períodos de 4 meses.

Verificação da Aderência dos Dados à Distribuição Normal.

Afim de testar a aderência da distribuição observada com o modelo Gaussiano, usou-se o método de Kolmogorov-Sminov, em que a variável de teste é a maior diferença observada entre a função de distribuição acumulada do modelo e da amostra. Este máximo é comparado com o valor crítico tabelado para 5 % de significância ⁵.

Para poder comparar a distribuição observada com a distribuição normal calculou-se ainda a distorção e a curtose.

A distorção caracteriza o grau de assimetria de uma distribuição em torno de sua média. Um valor enviesado positivo indica uma distribuição com uma ponta assimétrica que se estende em direção a valores mais positivos. Um valor enviesado negativo indica uma distribuição com uma ponta assimétrica que se estende em direção a valores mais negativos ⁶.

A curtose caracteriza uma distribuição em cume ou plana se comparada à distribuição normal. A curtose positiva indica uma distribuição relativamente em cume. A curtose negativa indica uma distribuição relativamente plana ⁶.

Relação entre os erros médios absolutos (em módulo) e a rotação

Afim de verificar qual a melhor relação entre os erros e a velocidade de rotação, ajustou-se uma série de linhas de tendências (linear, polinomial, potencial...) nos pontos experimentais. Calculou-se então o quadrado do coeficiente de correlação do momento do produto de Pearson para avaliar qual das linhas de tendência mais se ajusta à realidade experimental.

Calculou-se ainda o coeficiente de correlação entre os erros e a velocidade de rotação afim de verificar se um modelo linear é aceitável dentro de uma certa incerteza.

Verificação de Tendência (erro sistemático) nos Valores de Referência

Espera-se que a soma dos erros estatísticos e sistemáticos de todos os tacômetros juntos tende a apresentar uma distribuição Gaussiana de média nula. De fato, não há motivo aparente para que os erros dos tacômetros convirjam em média para um dado lado da referência (ver Figura I.1). Isto equívale a dizer que embora um dado tacômetro possa tender a indicar valores maiores que a referência, não há motivo qualquer aparente que impossibilite a existência de outro tacômetro que tenda a indicar valores menores do que a referência. Assim sendo, para uma amostra numerosa, os erros mesmo possuindo componentes sistemáticas intrínsecas a cada tacômetro tendem no geral ao próprio valor de referência. A menos que existam erros sistemáticos da própria instrumentação de referência e/ou método de calibração.

Partindo deste princípio, calculou-se a média de todos os erros absolutos. No caso de se obter valores significativamente diferentes do nulo, teremos então indícios de um possível erro sistemático no processo de calibração.

Comparação dos Resultados

Os dados foram agrupados segundo os tipos de tacômetro a que se referem, quais sejam óptico, de contato ou híbridos (óptico e de contato). É possível comparar os diferentes tipos de tacômetros analisando os erros médios, máximos e dispersões calculadas a partir dos dados.

De maneira análoga, foram comparados os tacômetros fornecidos por diferentes fabricantes. É importante salientar que a presença ou não de erros sistemáticos na referência não modifica em nada as comparações.

Resultados e Conclusões

Análise dos Dados de 1996

Aderência dos Dados à Distribuição Normal

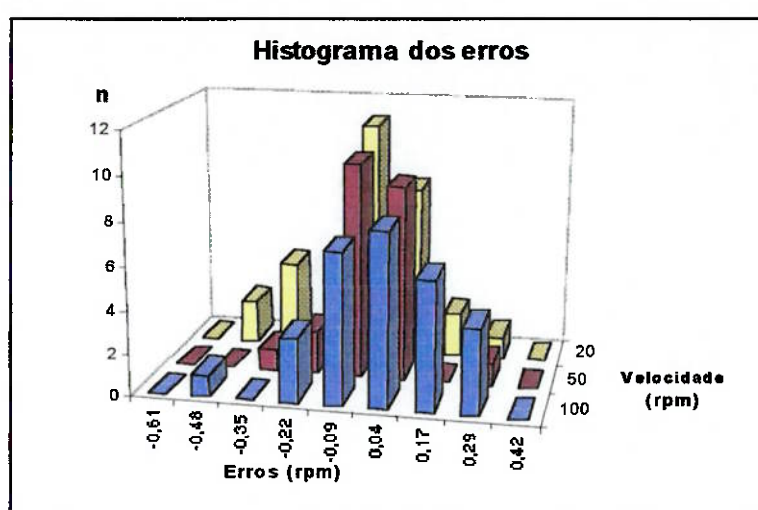


Figura I.3: Histograma dos erros dos tacômetros de contato - velocidades de rotação: 20,50 e 100 rpm

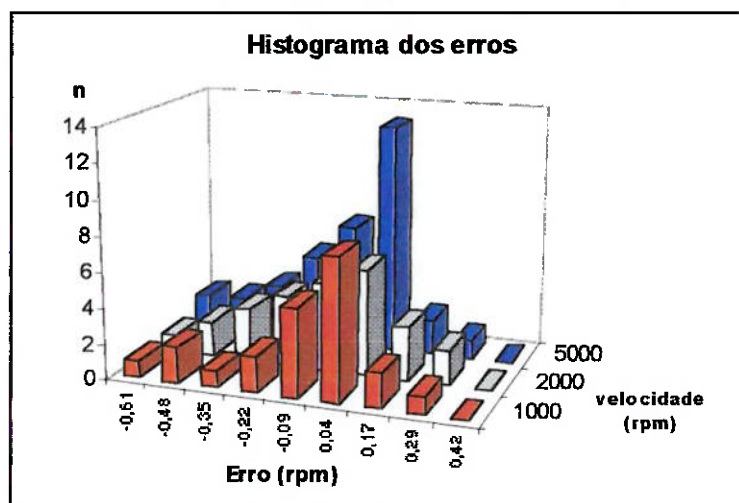


Figura I.4: Histograma dos erros dos tacômetros de contato - velocidades de rotação: 1000,2000 e 5000 rpm

Nas figuras 3 e 4 são apresentados os histogramas dos erros dos tacômetros de contato nas velocidades de rotação: 20, 50 e 100 rpm e 1000, 2000 e 5000 rpm. Observa-se que o comportamento se assemelha a uma distribuição normal. Por outro lado, a dispersão absoluta parece aumentar com a rotação e a média parece possuir uma maior tendência negativa em baixas rotações.

Segundo o teste de aderência pelo método de Kolmogorov-Smirnov, não se pode rejeitar a hipótese de normalidade da distribuição

A distorção obtida foi de uma maneira geral negativa (76 casos em 114), o que indica uma distribuição com uma ponta ligeiramente assimétrica que se estende em direção a valores mais negativos. Observa-se entretanto, alguns valores positivos (32 casos em 114) ou mesmo nulos (6 casos). De uma maneira geral, a distorção varia entre -1 e 1. É interessante notar que os tacômetros ópticos (tanto simples como híbridos opção óptica) possuem um comportamento melhor (distorção mais próxima de 0) do que os de contato (tanto simples como híbridos opção contato).

Aproximadamente a metade das curtoses calculadas são positivas (63 casos em 114). As curtoses calculadas, variam no geral entre -2 e 2 sendo que grande parte se encontra entre -0,3 e 0,3.

As análises descritas acima permitem concluir que as distribuições tendem a ser simétricas em relação ao eixo nulo com pouca distorção em relação à distribuição Gaussiana. Por outro lado, de maneira geral, não se pode concluir que a distribuição não apresenta uma curtose diferente do esperado para uma amostra de distribuição normal.

As observações acima permitem dizer que a distribuição de erros tende a ser Gaussiana.

Relação entre os erros médios absolutos (em módulo) e a rotação

Como esperado, observou-se primeiramente que a média dos erros cresce com o aumento da rotação. Isto do ponto de vista absoluto, já que relativamente o erro tende a decrescer com a rotação. Do mesmo modo observa-se que o desvio padrão absoluto tende igualmente a crescer com a rotação enquanto o desvio relativo decresce com o aumento desta.

Comparando diversas linhas ajustadas em relação ao coeficiente de correlação do momento do produto Pearson, observa-se que o melhor ajuste é dado pela linha de tendência polinomial de ordem 2, conforme as figuras 5 e 6.

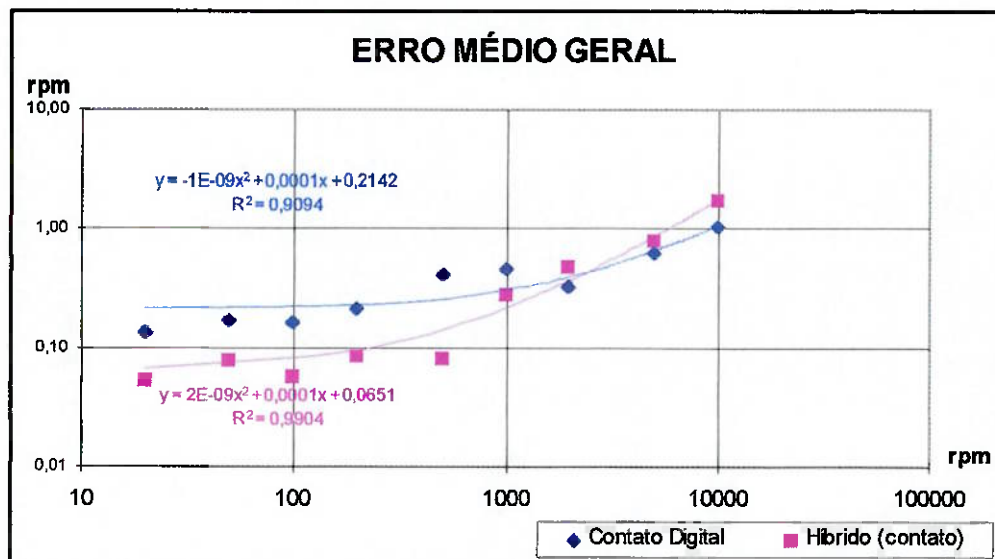


Figura I.5: Linha de tendência dos erros (em módulo) absolutos médios

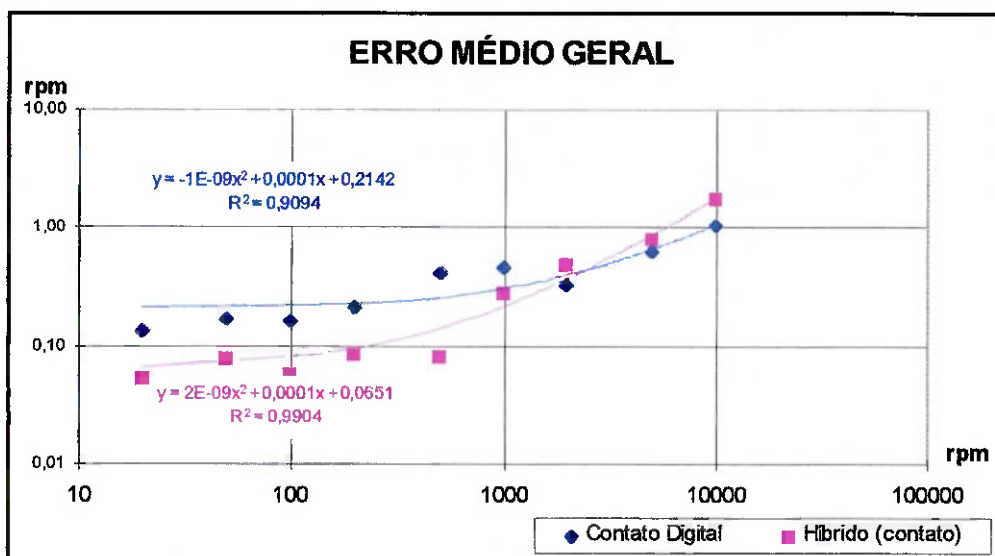


Figura I.6: Linha de tendência dos erros (em módulo) absolutos médios

Conforme podemos ver nas figuras I.5 e I.6, observa-se que os coeficientes dos polinômios para os diferentes tipos de tacômetro são semelhantes entre si. Sobretudo se relacionarmos os tacômetros simples de contato com os tacômetros simples ópticos, diferenciando estes, dos tacômetros de dupla função, pelo menos quanto ao termo linear.

De fato, observa-se que os três coeficientes das linhas ajustadas para os tacômetros de contato e ópticos são aproximadamente iguais: o termo linear sendo 0,21; o termo de primeira ordem sendo 10^{-4} ; e o termo de segunda ordem por volta de $-1,5 \cdot 10^{-9}$.

Esta semelhança ocorre também entre as duas funções dos tacômetros de foto-contato (híbridos). Nota-se que este tipo de tacômetro possui, entretanto, um termo linear maior (da ordem de 10^{-2}). Observa-se ainda que o termo de segunda ordem passa a ser positivo para a opção de contato (embora continue na mesma ordem de grandeza: 10^{-9}).

Embora o melhor ajuste seja dado pela curva polinomial de ordem 2, o termo de segunda ordem é 10^5 vezes menor que o termo de primeira ordem. Assim, o ajuste linear aparece como uma tendência razoável dentro de uma certa incerteza.

Calculando-se o coeficiente de correlação com a rotação, obtém-se tanto para o erro médio quanto para o desvio ou ainda para o erro máximo correlações bastante próximas de 1 atingindo 0.99 para o erro médio no caso geral de tacômetros híbridos opção óptica, 0.97 para o desvio no caso de tacômetros ópticos, 0.92 para o erro máximo no caso de tacômetros híbridos opção contato. Esta correlação indica que o erro médio tende a aumentar linearmente com a rotação assim como o desvio padrão e, obviamente isto faz com que o erro máximo também tenda a aumentar linearmente com a rotação.

Conforme as considerações acima, observa-se que o erro médio tende a apresentar uma relação polinomial pelo menos de primeira ordem em função da velocidade de rotação.

Tendência nos Valores de Referência

Nas figuras I.7 a I.10 são representados os erros relativos médios dos resultados das calibrações feitas no ano de 1996. Os limites mostrados no gráfico representam a soma do erro médio com o erro limite ($\pm 3\sigma$).

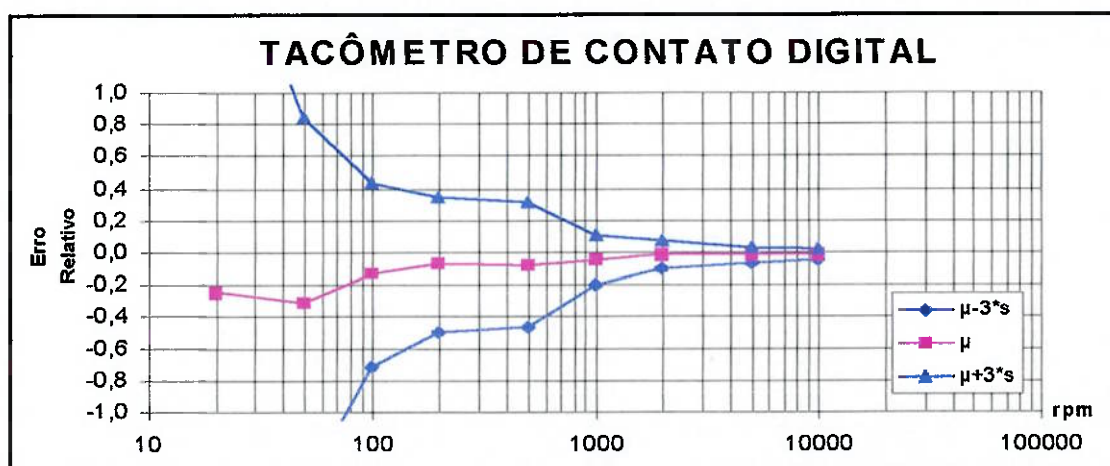


Figura I.7: Erros relativos médios. Ano de 1996 - 29 casos

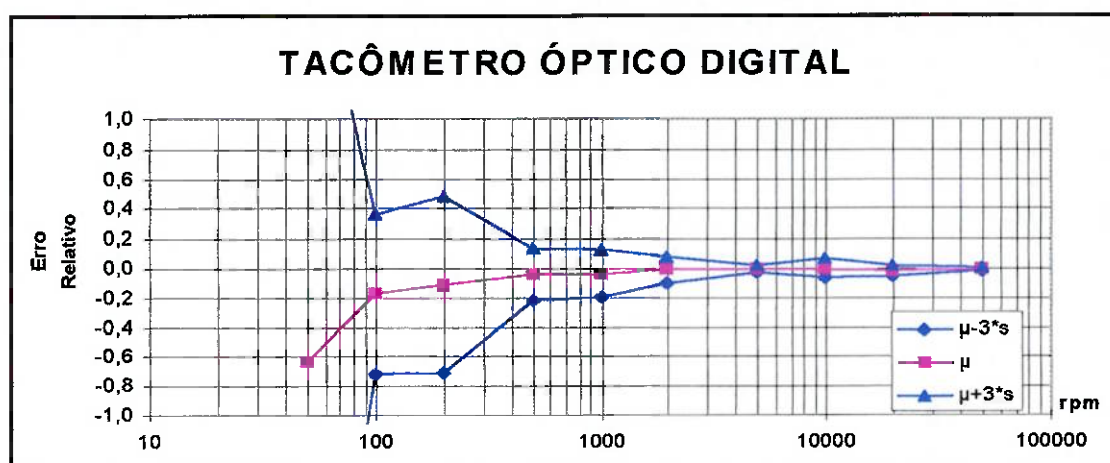


Figura I.8: Erros relativos médios. Ano de 1996 - 18 casos

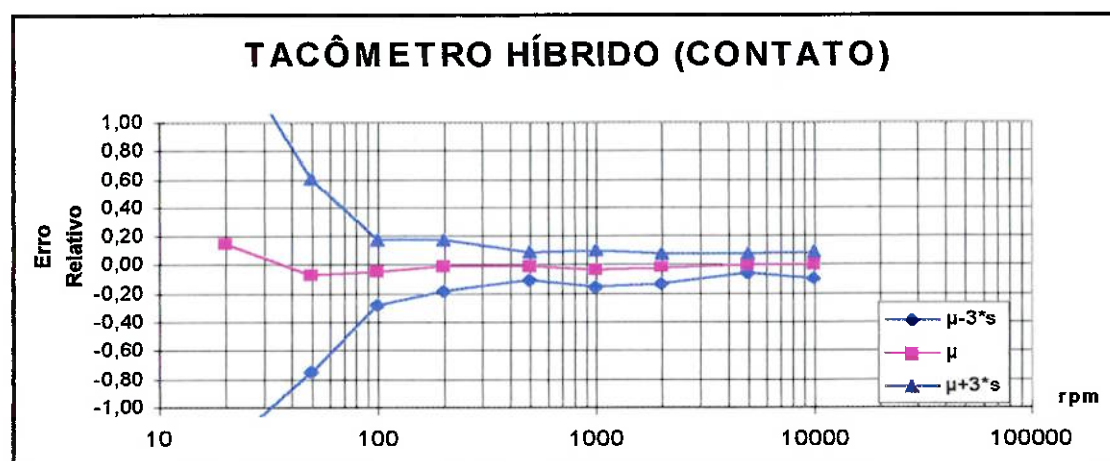


Figura I.9: Erros relativos médios. Ano de 1996 - 9 casos

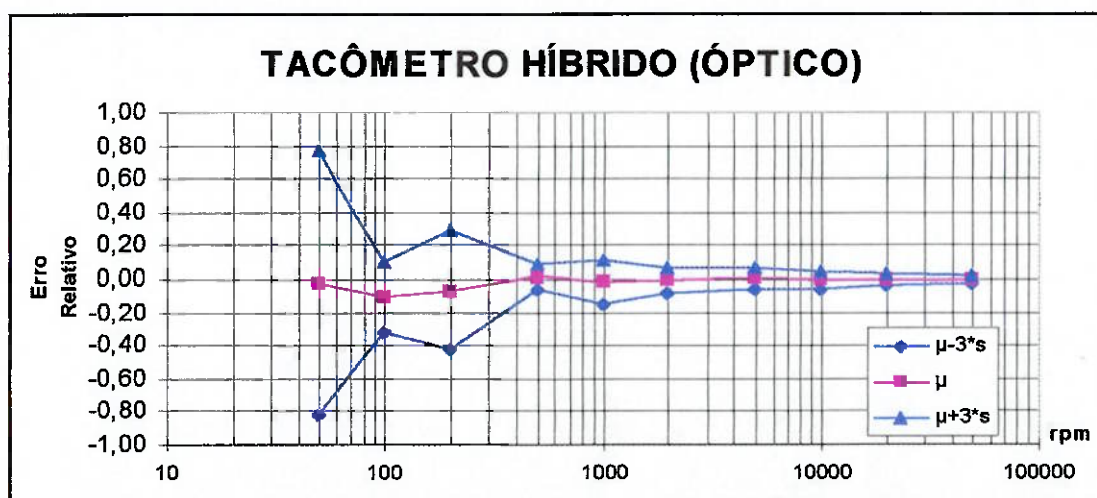


Figura I.10: Erros relativos médios. Ano de 1996 - 9 casos

Observa-se nas figuras 6 a 9 que independentemente do tipo de tacômetro, os erros limites percentuais tendem a decrescer rapidamente com a rotação até atingir valores significativamente baixos (por volta de 0,1 a 0,01%).

Os erros médios apresentam uma certa tendência negativa, principalmente no caso dos tacômetros ópticos em baixas rotações. Esta tendência parece diminuir a medida que a rotação aumenta. Afim de melhor estudar esta tendência, calculou-se os intervalos de confiança para as médias, apresentados nas figuras 10 a 13:

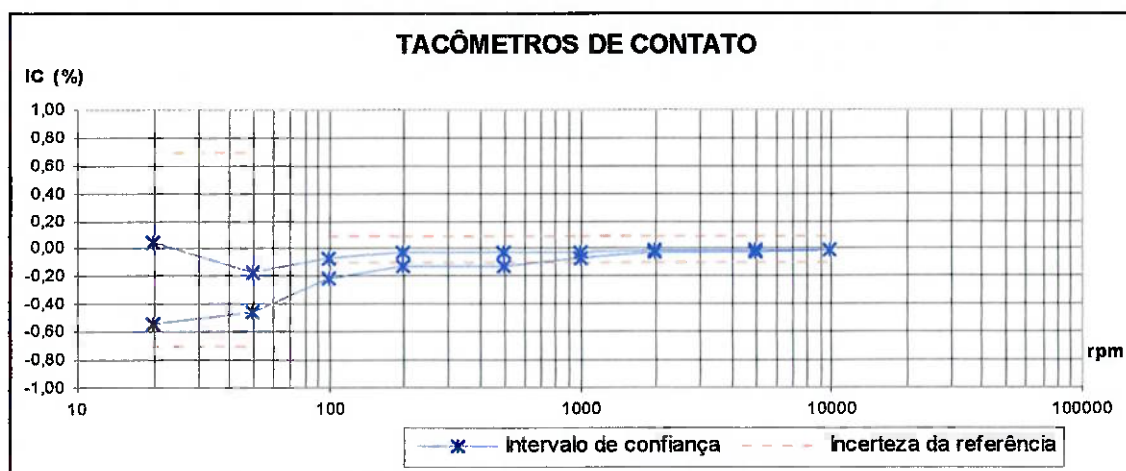


Figura I.11: Intervalo de confiança em função da rotação

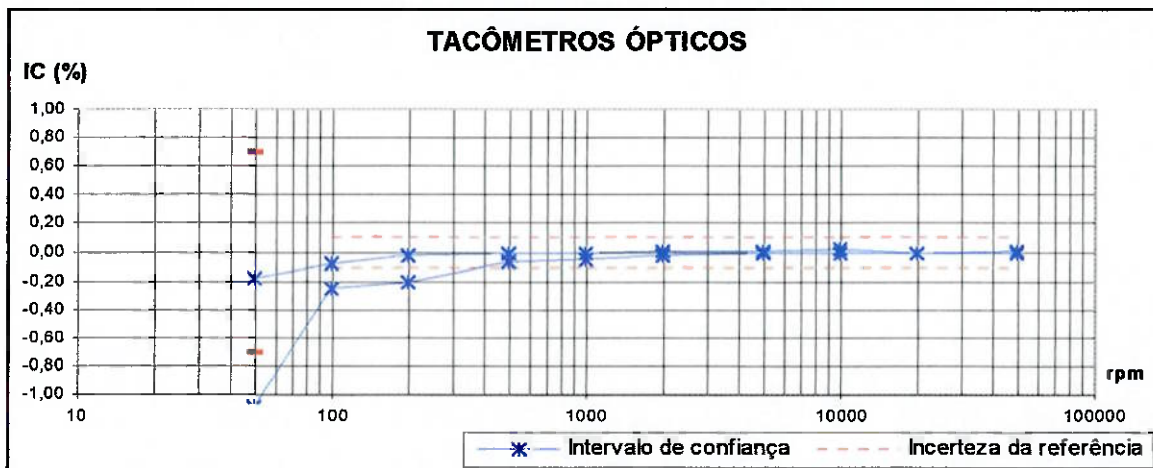


Figura I.12: Intervalo de confiança em função da rotação

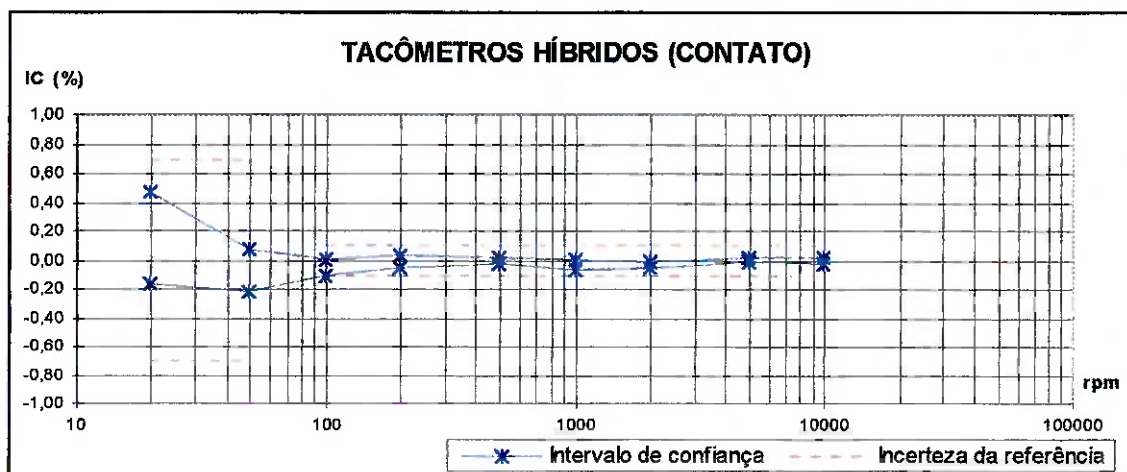


Figura I.13: Intervalo de confiança em função da rotação

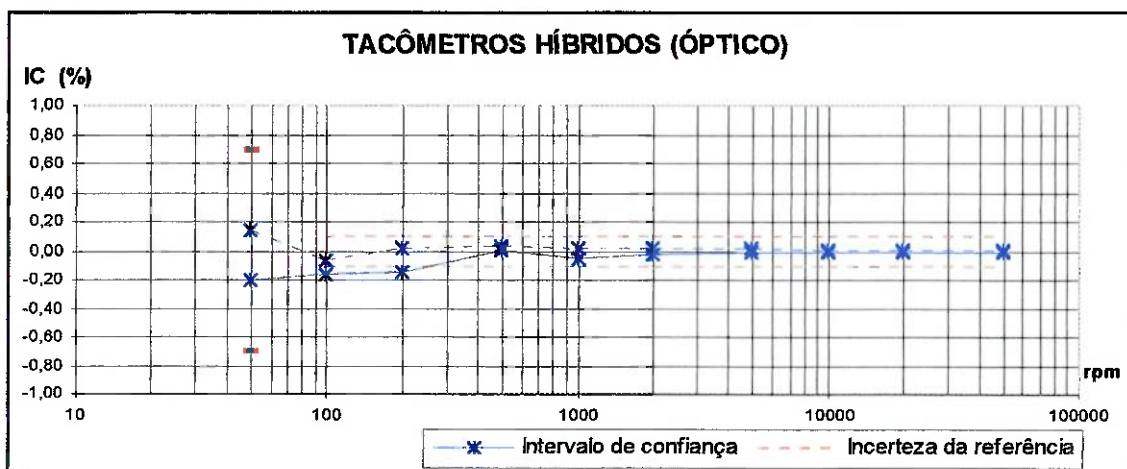


Figura I.14: Intervalo de confiança em função da rotação

Os intervalos de confiança para os dados de 1996, não permitem rejeitar, na maioria dos casos, a hipótese de que a média não é nula. Isto não vale entretanto no caso dos tacômetros ópticos em rotações inferiores à 500 rpm. É interessante notar que a medida que a rotação aumenta, o intervalo de confiança vai se estreitando e tende a um valor nulo ou muito próximo de zero.

A linha tracejada vermelha representa a incerteza da referência. Admite-se uma incerteza limite de 0,7% para rotações inferiores a 100 rpm e de 0,1% para rotações de 100 a 50 000 rpm. Observa-se que o aumento de incerteza da própria referência em baixas rotações é observado igualmente experimentalmente. Nota-se ainda que a grosso modo, a incerteza da referência contém o intervalo de confiança da média dos erros, excluindo o caso dos tacômetros ópticos que possuem uma forte tendência negativa em rotações abaixo de 200 rpm, provocando uma discordância entre as duas áreas.

Comparação Entre os Diferentes Tipos de Tacômetros

Analizando as figuras 4 a 13, já podemos tirar algumas conclusões: observa-se primeiramente que os tacômetros ópticos não possuem grande acurácia (menor erro médio) em rotações inferiores à 500 rpm, e tendem a apresentar medidas piores (quanto à acurácia) do que os tacômetros de contato nas baixas rotações. Entretanto, em altas rotações, os tacômetros ópticos possuem grande precisão relativa (ou seja menor dispersão relativa) assim como melhor acurácia. O estreitamento do erro limite causado pela queda do desvio padrão mostra um aumento de precisão em altas rotações, independentemente do tipo de tacômetro. Isto significa uma maior repetitividade dos resultados em altas rotações. A precisão dos tacômetros ópticos (ou híbridos opção óptica) refletida pelo desvio padrão é melhor (caso geral) do que a precisão dos tacômetros de contato (ou híbridos opção contato).

De maneira geral, observa-se que independentemente do critério de comparação utilizado, os tacômetros de contato digital mostram-se mais eficazes do que os ópticos em baixas velocidades de rotação. Em altas velocidades de rotação, esta relação se inverte e os tacômetros ópticos passam a mostrar um melhor desempenho.

Observando novamente as figuras I.5 e I.6, nota-se que os erros (em módulo) absolutos médios dos tacômetros híbridos são menores do que para os tacômetros de função simples.

Tabela I.1: Dispersão dos erros (em módulo) absolutos

	Contato	Óptico	Híbrido (cto)	Híbrido (ópt.)
20	0,11	não existe	0,08	não existe
50	0,18	0,38	0,08	0,09
100	0,16	0,15	0,07	0,06
200	0,23	0,28	0,08	0,17
500	0,63	0,23	0,14	0,12
1000	0,52	0,45	0,43	0,43
2000	0,57	0,48	0,71	0,43
5000	0,82	0,38	0,82	0,86
10000	1,02	1,08	0,76	1,41
20000	não existe	1,80	não existe	1,58
50000	não existe	2,83	não existe	3,76

A tabela I.1 mostra que a dispersão dos erros (em módulo) absolutos apresentada pelos tacômetros híbridos é menor do que para os tacômetros de função simples.

Assim, pode-se dizer que os tacômetros híbridos são melhores do que os função simples. Isto se deve talvez ao fato dos tacômetros híbridos serem mais modernos e novos.

Comparação Entre as Diversas Marcas de Tacômetros

Todo o estudo estatístico foi feito discriminando as principais marcas de tacômetro. Assim, há uma vasta gama de dados que permitem comparar os diferentes fabricantes, assim como: Desvio Padrão, Erro Máximo, Tendência (média dos Erros), etc.

Todos os conjuntos de dados levam às mesmas conclusões qualitativas. Optou-se aqui por apresentar a média dos módulos dos erros absolutos (rpm):

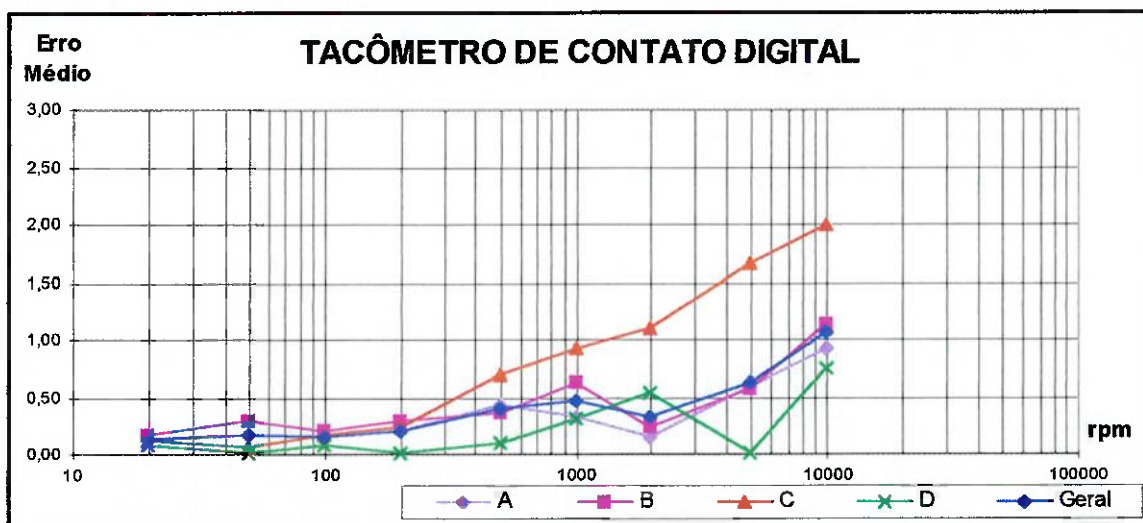


Figura I.15: Erro (em módulo) absoluto médio (rpm) para diferentes marcas (Tac. de contato)

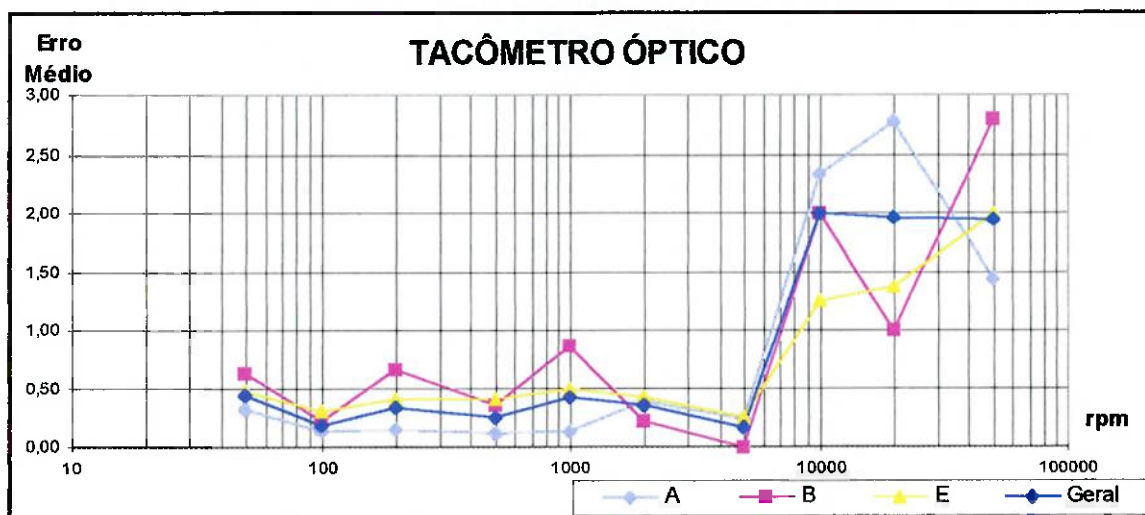


Figura I.16: Erro (em módulo) absoluto médio (rpm) para diferentes marcas (Tac. de óptico)

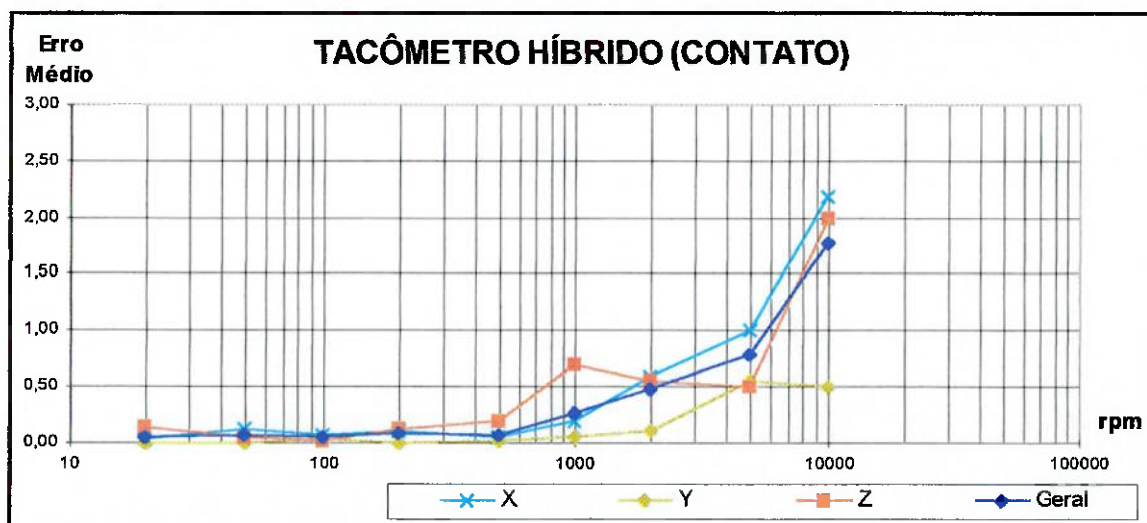


Figura L.17: Erro (em módulo) absoluto médio (rpm) para diferentes marcas (híbrido/contato)

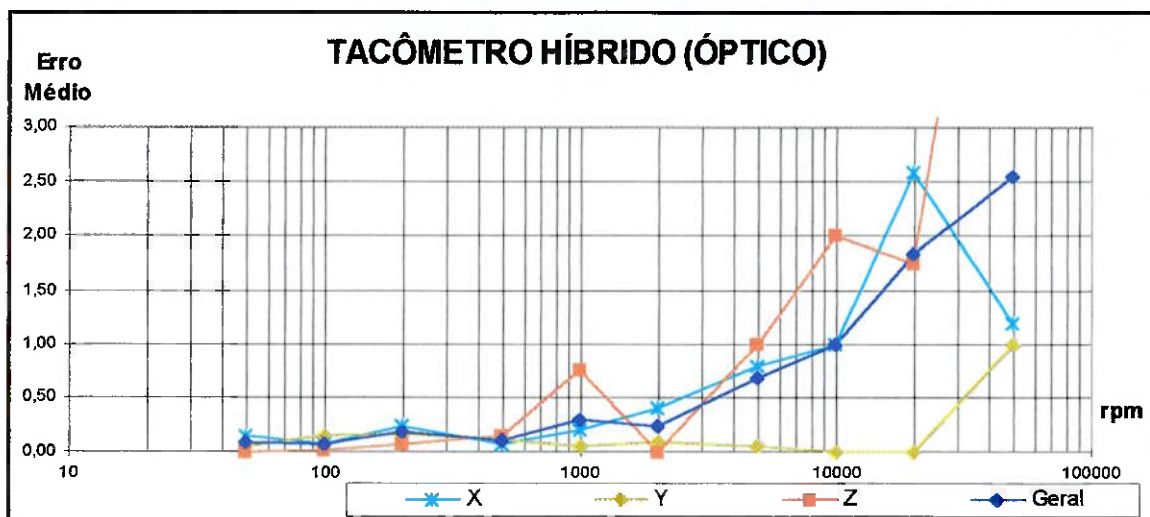


Figura L.18: Erro (em módulo) absoluto médio (rpm) para diferentes marcas (Tac. óptico)

É possível perceber através dos gráficos acima que certos fabricantes atingem uma melhor performance em determinadas faixas de rotação. Assim, dentre os tacômetros híbridos, na opção de contato, a marca Y apresenta o menor erro (em módulo) médio. Na opção óptica, a marca Z seria a mais indicada para rotações inferiores a 300 rpm enquanto a marca Y seria a melhor para rotações acima de 300 rpm.

Dentre os fabricantes de tacômetros do tipo óptico, o melhor desempenho até 1000 rpm é obtido pelo fabricante A. Em rotações acima de 1000 rpm, a marca E é talvez a mais apropriada. Observe que esta mesma marca E apresenta um dos piores desempenhos abaixo

de 1000 rpm, do mesmo modo que a marca A apresenta um comportamento relativamente ruim para rotações acima de 1000 rpm.

Os tacômetros de contato possuem de certo modo um comportamento diferenciado, já que a marca C tende a apresentar um desempenho inferior, principalmente nas altas rotações. As demais seguem a tendência média, mesmo se a marca D atinge uma melhor performance em quase toda a faixa de rotação.

Análise dos Dados de 1997

O estudo feito a partir dos dados de 1996 permitiu visualizar o comportamento geral dos diferentes tipos/marcas de tacômetros, assim como analisar os resultados fornecidos pela bancada de calibração. O objetivo em 1997 foi de garantir a qualidade dos serviços prestados. Ou seja, a preocupação nesta fase foi de verificar se as tendências pioraram (ou melhoraram), e verificar se a dispersão aumentou (ou diminuiu) significativamente, garantindo assim a qualidade do serviço prestado. De fato, a identificação de uma mudança de comportamento estatístico pode levar a identificação de problemas físicos/mecânicos ou de operação.

O ano foi dividido em 3 períodos. São estes: janeiro - junho, julho - setembro e outubro - dezembro. Esta divisão deixa os grupos estatisticamente equivalentes.

As figuras I.19 a I.21 representam a evolução dos tacômetros ópticos digitais nestes períodos:

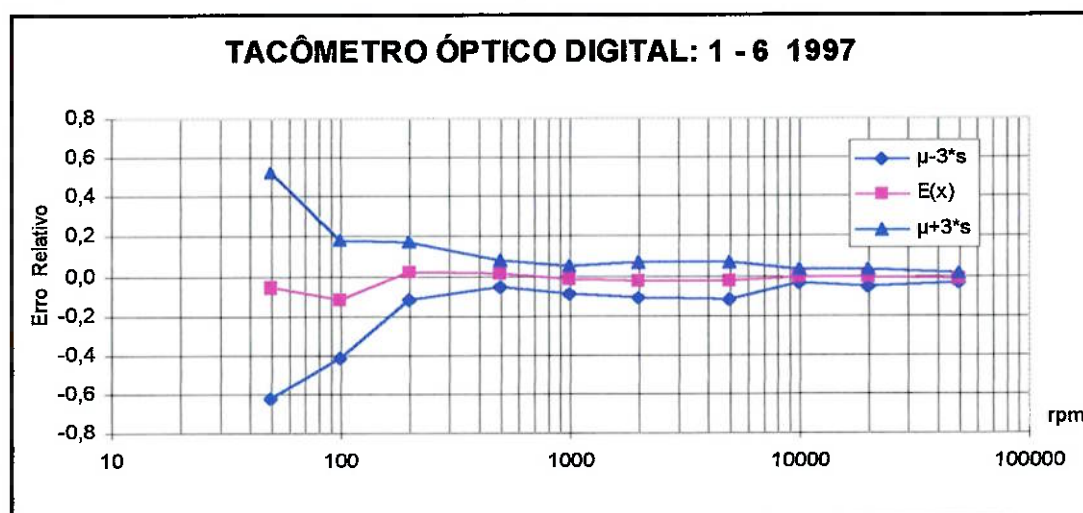


Figura I.19: Erro médio e erro limite em função da rotação

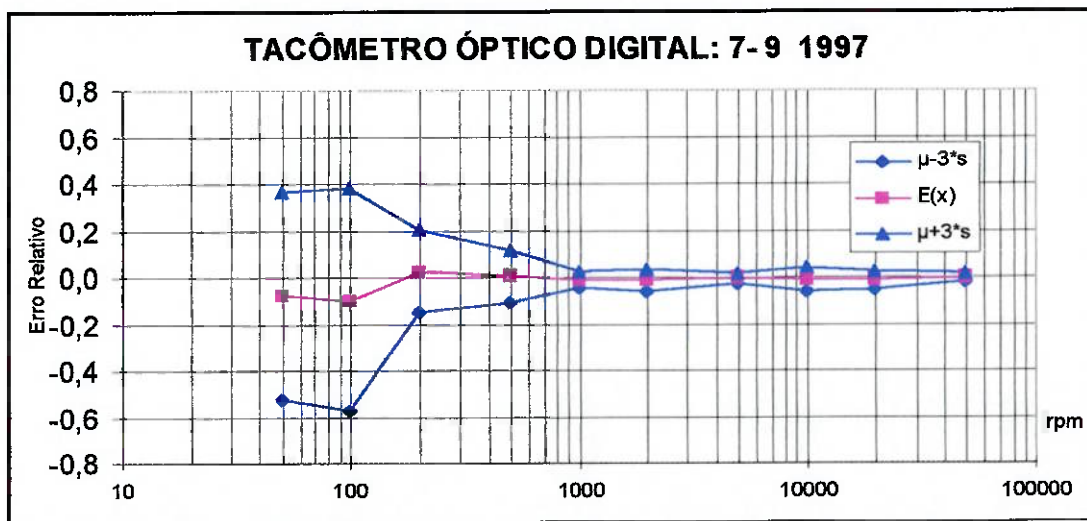


Figura I.20: Erro médio e erro limite em função da rotação

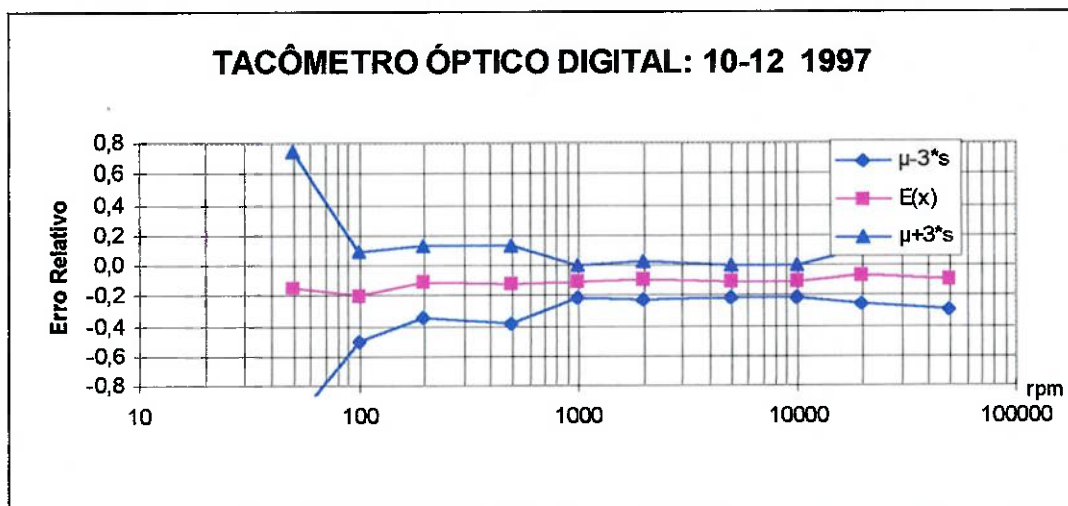


Figura I.21: Erro médio e erro limite em função da rotação

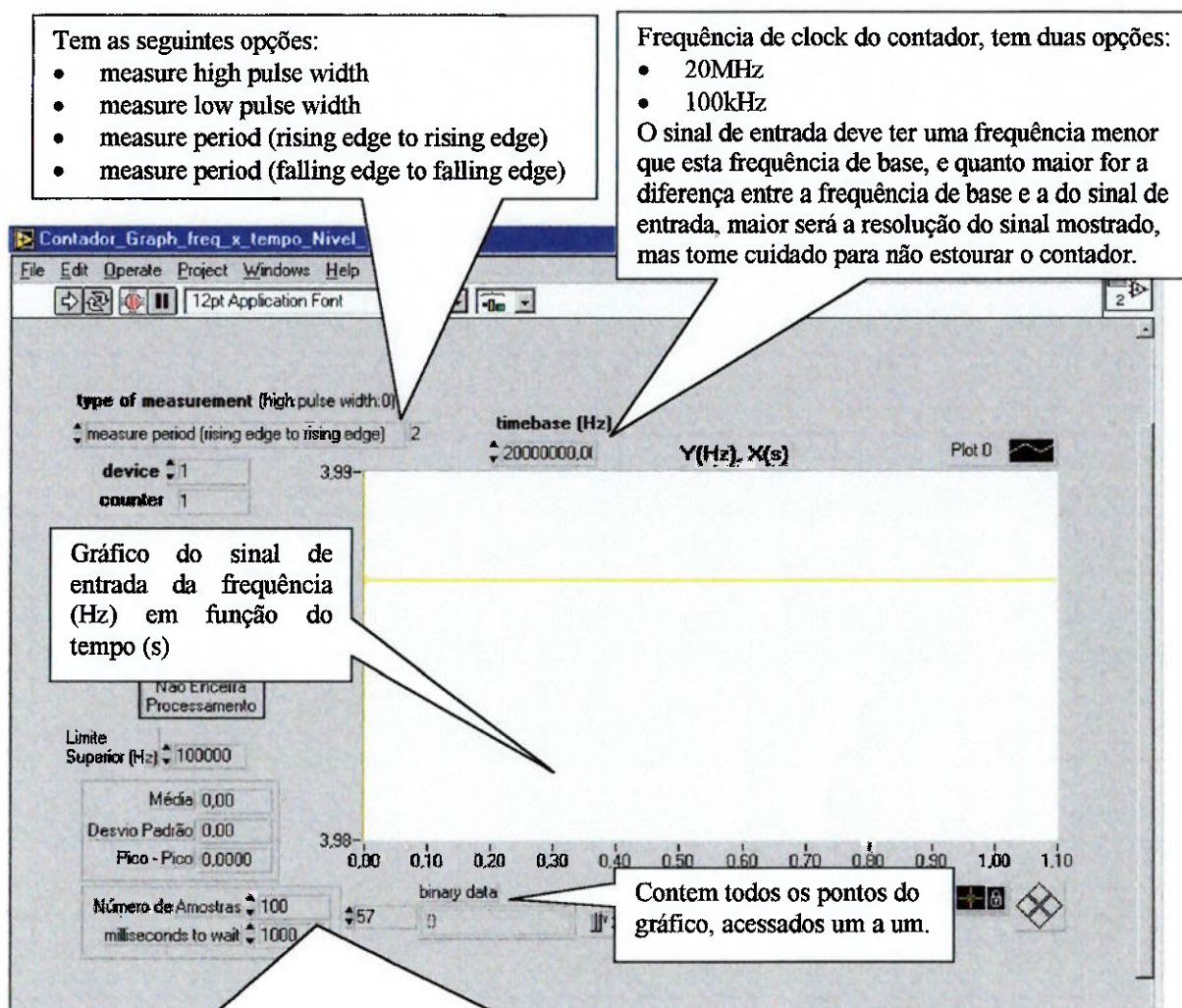
Nos períodos janeiro a junho e julho a setembro foi observado um comportamento semelhante ao observado em 1996, com uma melhora na tendência em baixas rotações, atribuída a um aperfeiçoamento do procedimento.

No período de outubro ÷ dezembro, a distribuição se modificou significativamente. De fato, observa-se uma nítida tendência negativa (por volta de 0,1%) em toda a gama de rotação. Observa-se também uma mudança quanto à dispersão: esta permanece constante a medida que a rotação aumenta, em contraste com o comportamento anterior onde a dispersão relativa (%) tende a diminuir com a mesma.

Esta alteração no perfil de erros poderia ser explicada por um lote defeituoso. Mas, apesar da maioria dos tacômetros ópticos calibrados neste período terem sido fabricados pelo mesmo fabricante e pertencerem a um mesmo lote, estas mudanças na distribuição de erros também é observada pelos tacômetros de contato digital e pelos tacômetros híbridos, estas duas categorias apresentando uma grande variabilidade de marcas.

Assim, pode-se concluir que houve uma deterioração do equipamento ou uma mudança nas condições de operação.

ANEXO II - v.i. contador



Estas informações são importantes, e devem ser checadas sempre que tiver uma grande alteração da frequência do sinal de entrada.

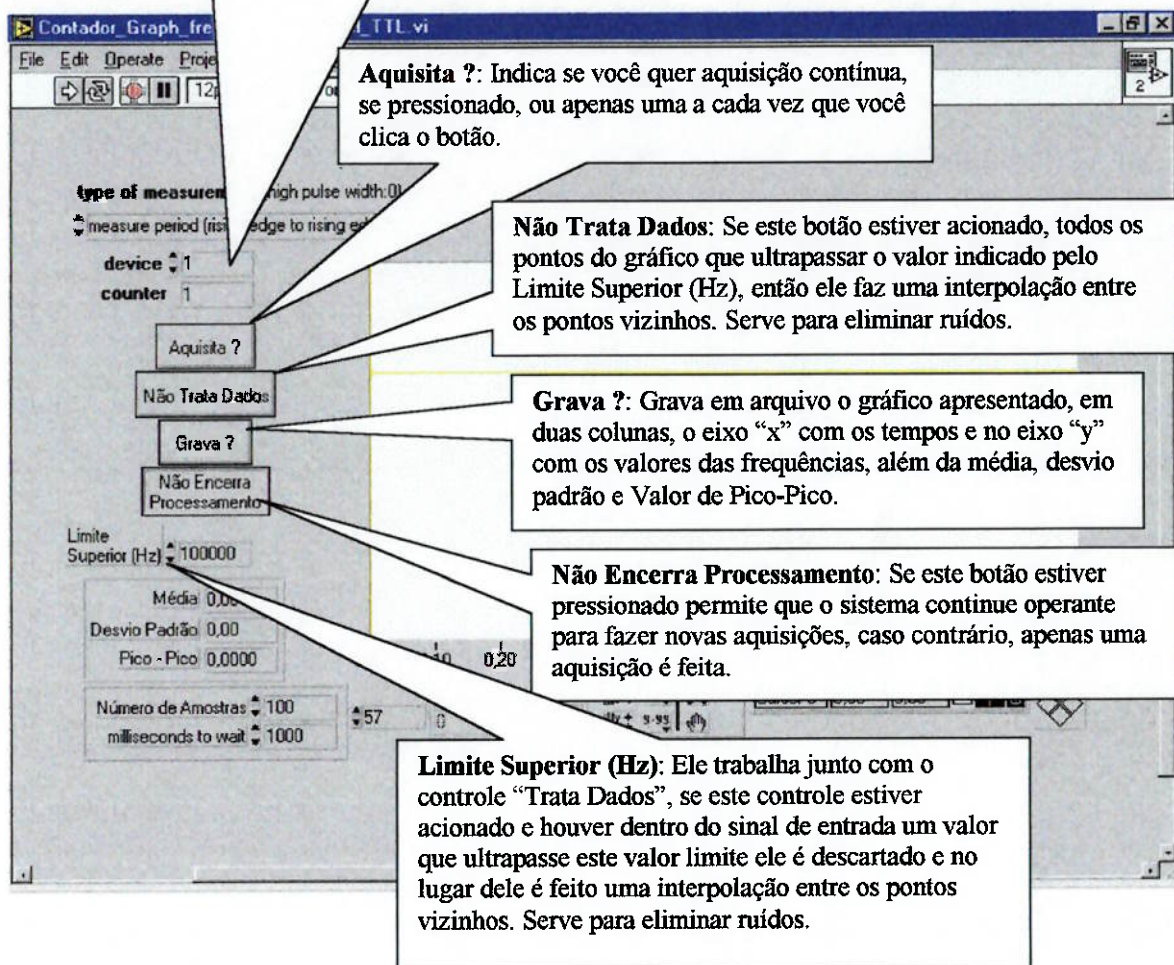
Número de Amostras = Estando o "type of measurement" na posição 2, o número indicado por este controle irá dizer que o sistema irá adquirir este número de ciclos (ou períodos) do sinal de entrada

milliseconds to wait = Indica que o sistema irá esperar este tempo determinado para contar o número de ciclos do sinal de entrada, caso o sistema espere este tempo e a entrada ainda não tiver completado o número de ciclos, o sistema devolve um erro.

Vamos supor que o sistema esteja adequado para medir uma frequência de 1kHz de um sinal de entrada, e para isto os controles estavam com os seguintes valores:

Número de Amostras = 1000 e **milliseconds to wait** = 1200, Notamos neste caso que para uma frequência completar 1000 ciclos ela precisa de 1 segundo ou 1000ms, e o sistema irá esperar 1200ms, que é tempo suficiente para o sinal de entrada. Agora se o seu sinal de entrada cair para 100Hz, agora para o sinal de entrada completar 1000 ciclos ele demorará 10 segundos, e o sistema está configurado para esperar apenas 1,2s e quando terminar o tempo e o sistema perceber que não foram completados todos os ciclos então o sistema retorna um erro, e para corrigir este erro o controle, **milliseconds to wait** tem que ser maior que 10s, ou por exemplo, poderia ser 11000.

device: Indica qual placa DAQ você está usando.
counter: Indica qual contador está utilizando, o contador que estava sendo usado, quando este documento foi escrito, é o "1".



ANEXO III

Vibração Torcional no Eixo de Entrada

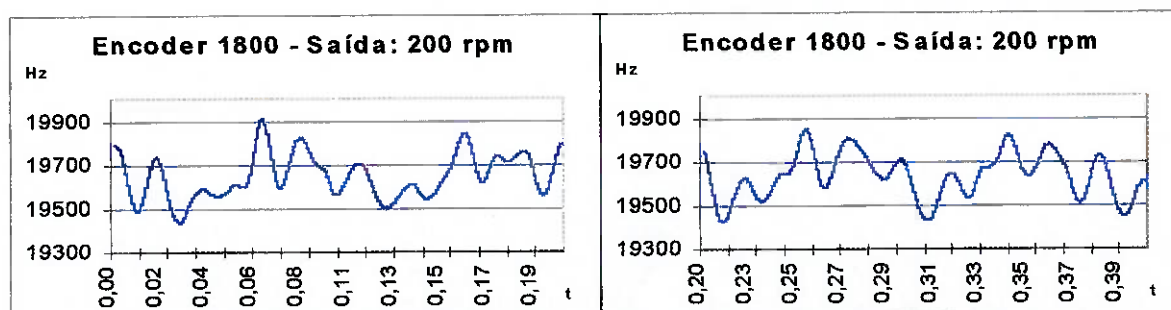


Figura III.1 - Vibração torcional a 200 rpm com a CHAVETA BOA

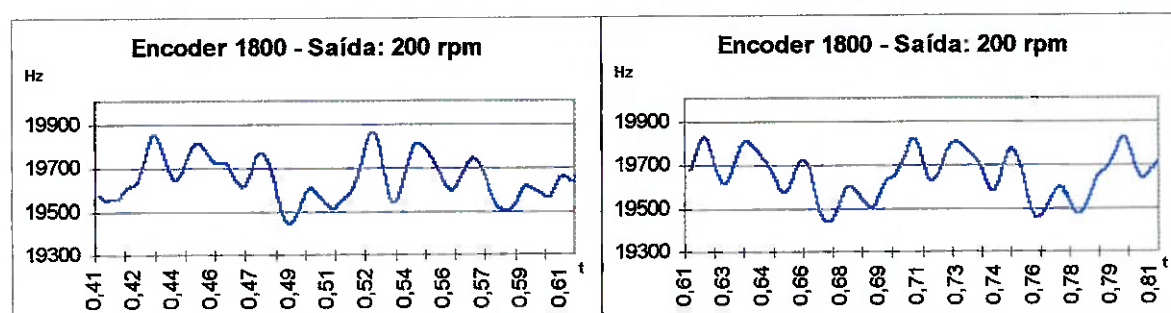


Figura III.2 - Vibração torcional a 200 rpm (redutor) com a CHAVETA BOA

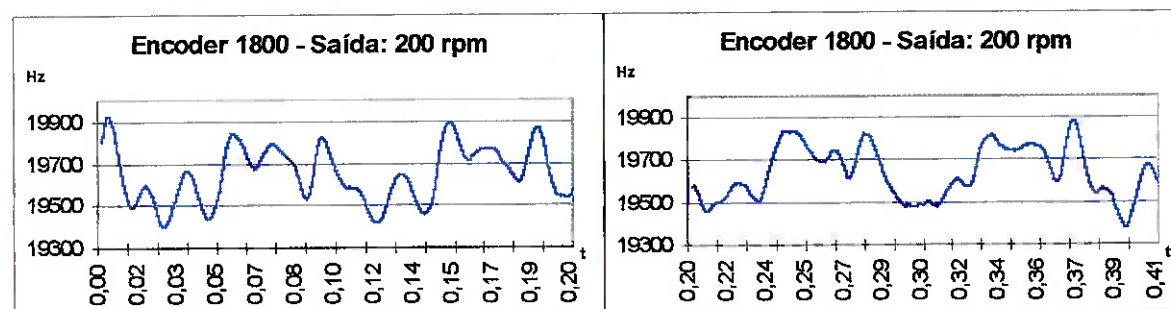


Figura III.3 - Vibração torcional a 200 rpm (redutor) com a CHAVETA RUIM

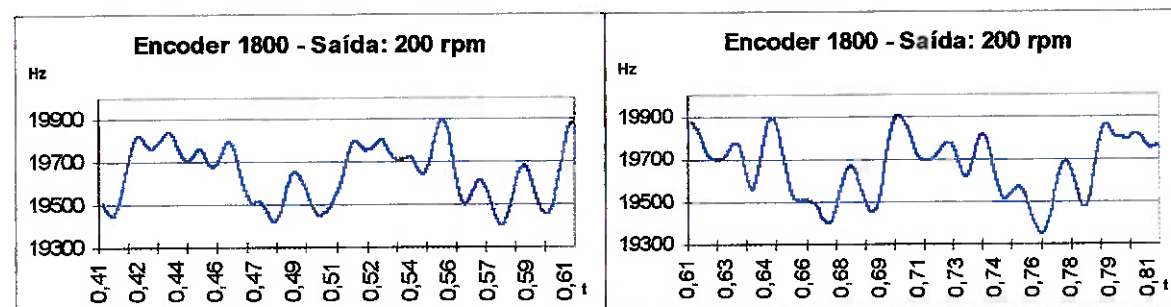


Figura III.4 - Vibração torcional a 200 rpm (redutor) com a CHAVETA RUIM

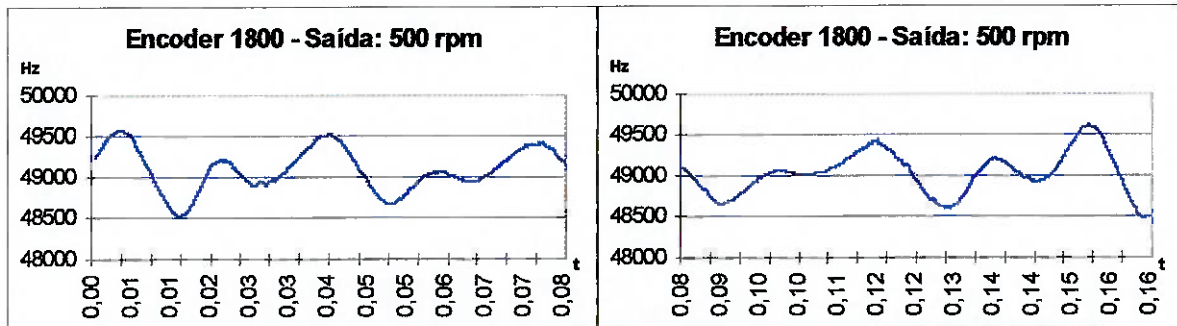


Figura III.5 - Vibração torcional a 500 rpm (redutor) com a CHAVETA BOA

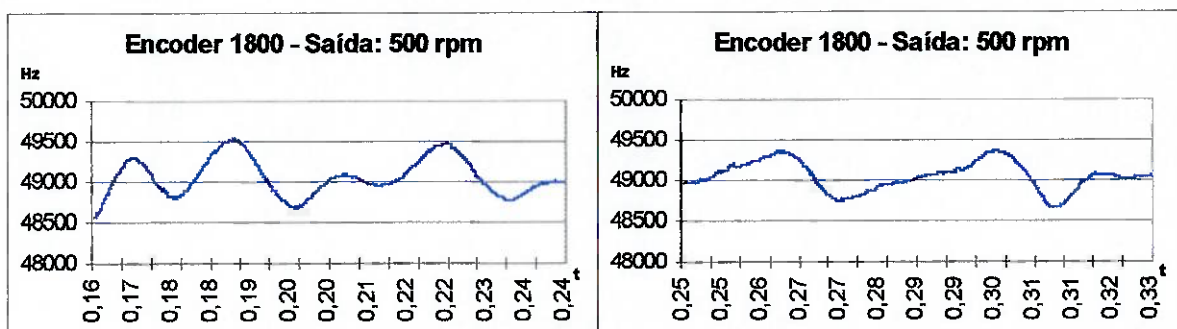


Figura III.6 - Vibração torcional a 500 rpm (redutor) com a CHAVETA BOA

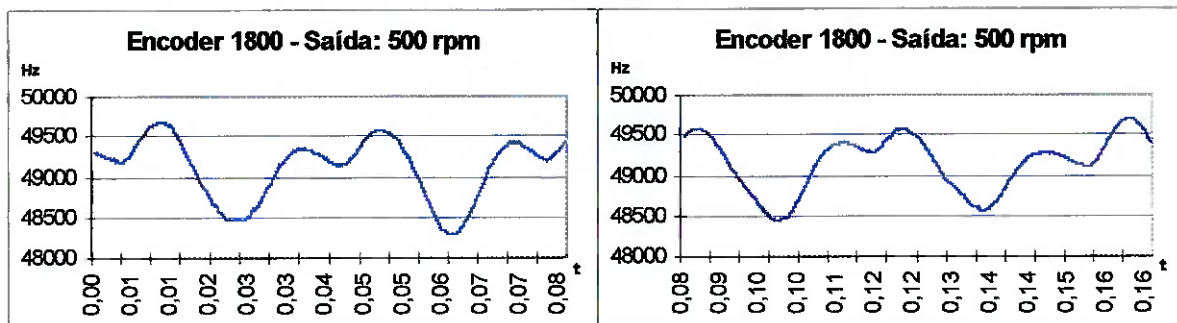


Figura III.7 - Vibração torcional a 500 rpm (redutor) com a CHAVETA RUIM

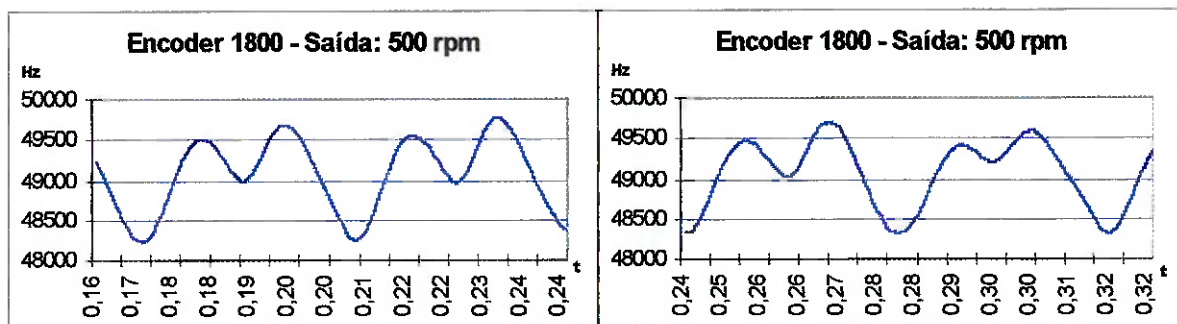


Figura III.8 - Vibração torcional a 500 rpm (redutor) com a CHAVETA RUIM

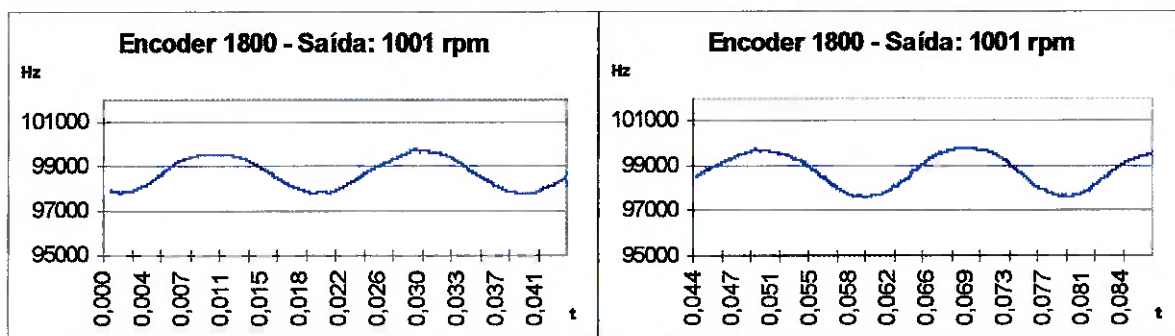


Figura III.9 - Vibração torcional a 1001 rpm (redutor) com a CHAVETA BOA

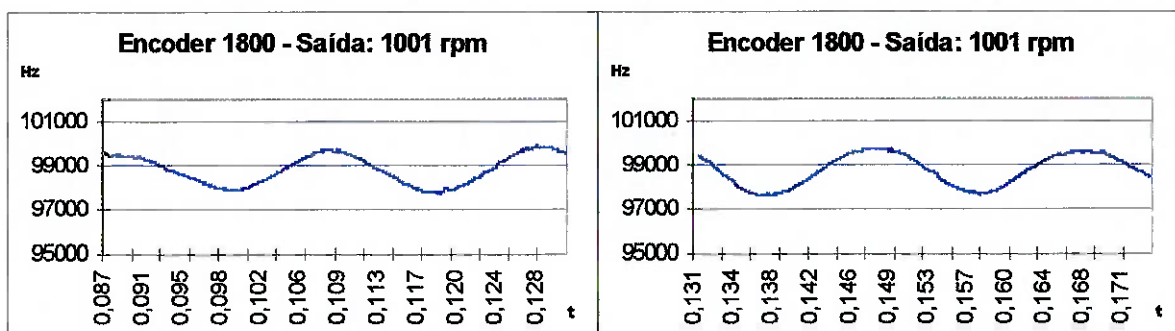


Figura III.10 - Vibração torcional a 1001 rpm (redutor) com a CHAVETA BOA

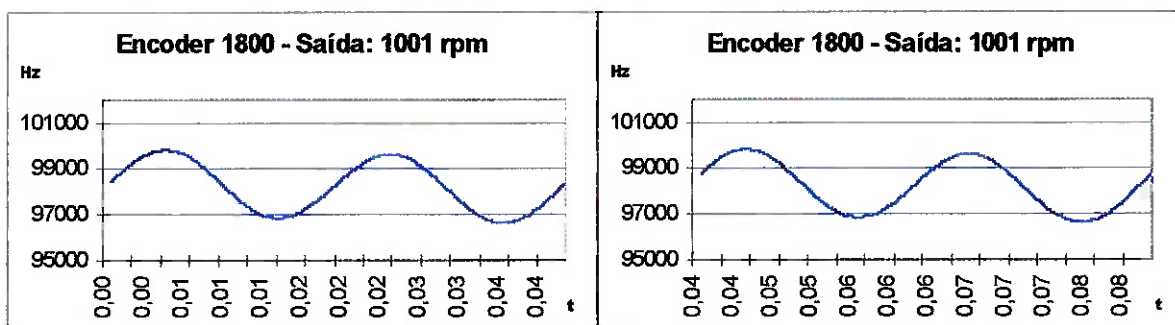


Figura III.11 - Vibração torcional a 1001 rpm (redutor) com a CHAVETA RUIM

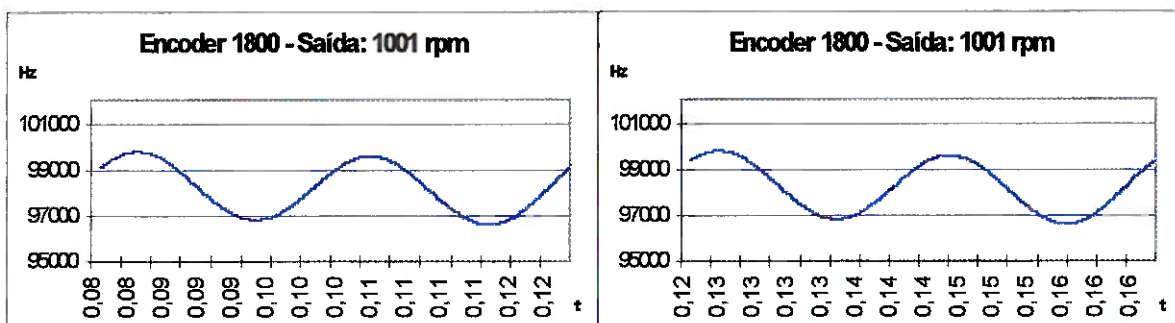


Figura III.12 - Vibração torcional a 1001 rpm (redutor) com a CHAVETA RUIM

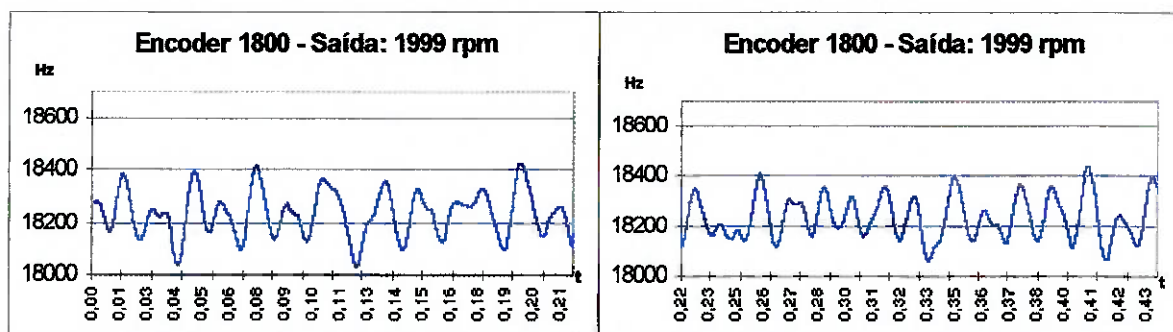


Figura III.13 - Vibração torcional a 1999 rpm (multiplicador) com a CHAVETA BOA

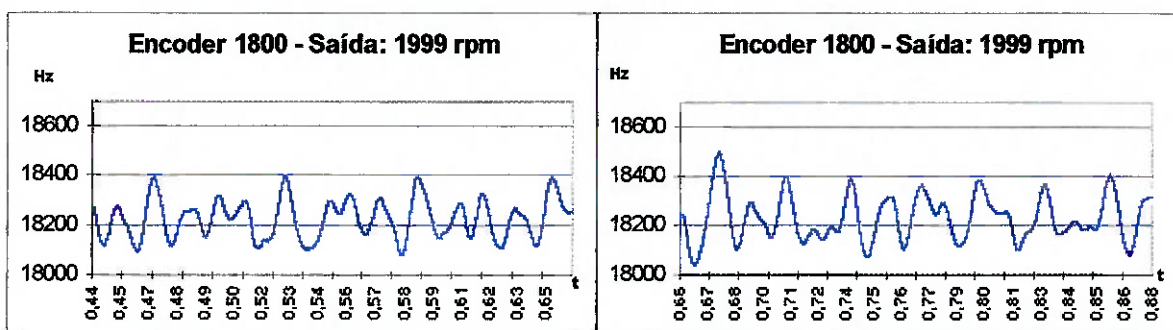


Figura III.14 - Vibração torcional a 1999 rpm (multiplicador) com a CHAVETA BOA

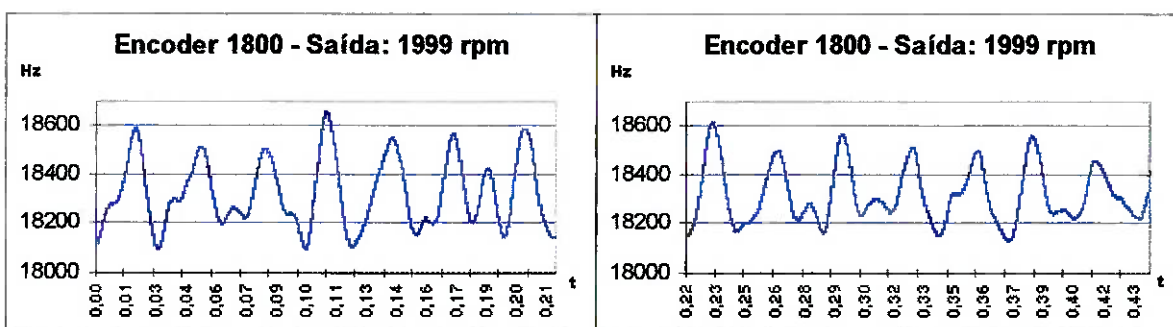


Figura III.15 - Vibração torcional a 1999 rpm (multiplicador) com a CHAVETA RUIM

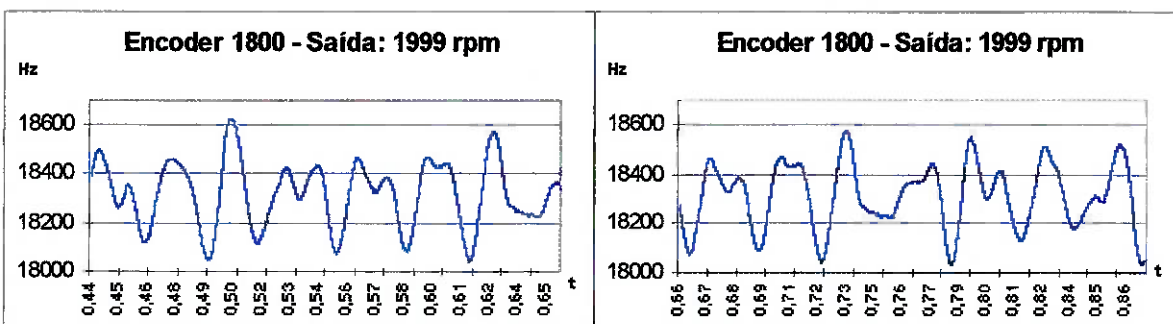


Figura III.16 - Vibração torcional a 1999 rpm (multiplicador) com a CHAVETA RUIM

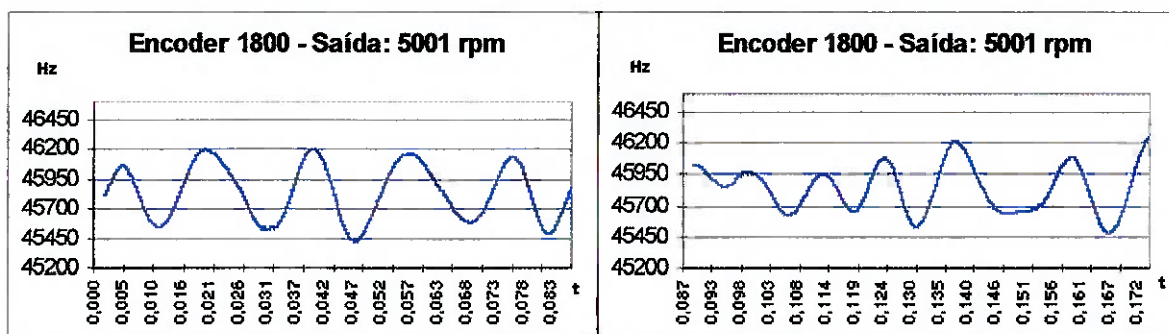


Figura III.17 - Vibração torcional a 5001 rpm (multiplicador) com a CHAVETA BOA

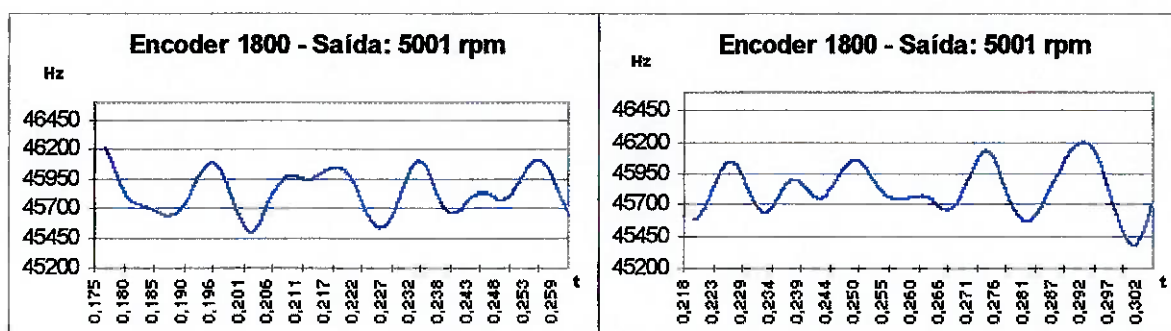


Figura III.18 - Vibração torcional a 5001 rpm (multiplicador) com a CHAVETA BOA

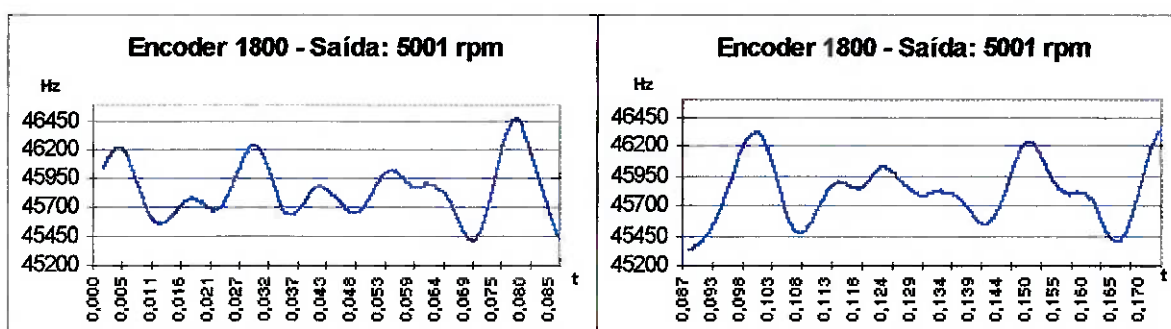


Figura III.19 - Vibração torcional a 5001 rpm (multiplicador) com a CHAVETA RUIM

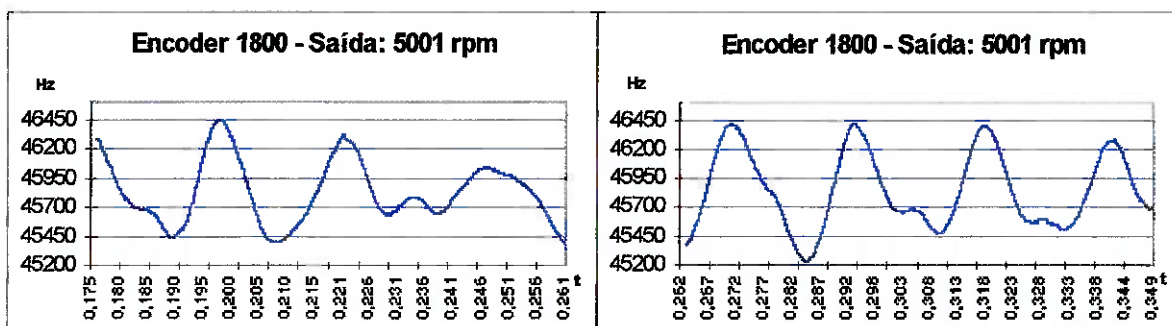


Figura III.20 - Vibração torcional a 5001 rpm (multiplicador) com a CHAVETA RUIM

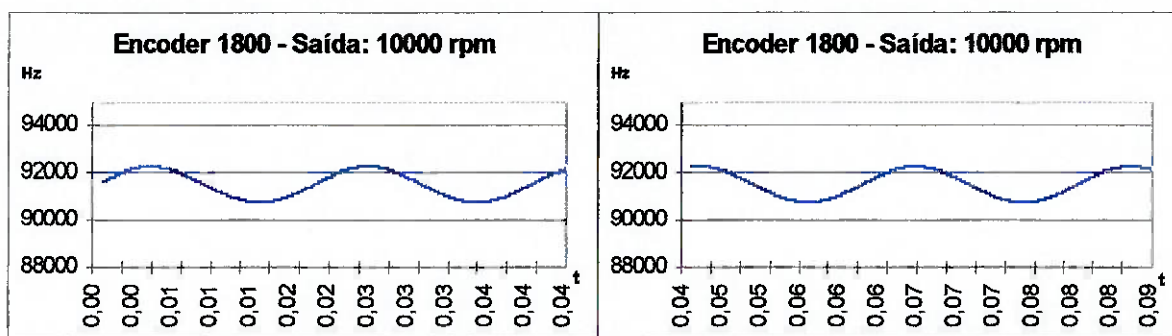


Figura III.21 - Vibração torcional a 10.000 rpm (multiplicador) com a CHAVETA BOA

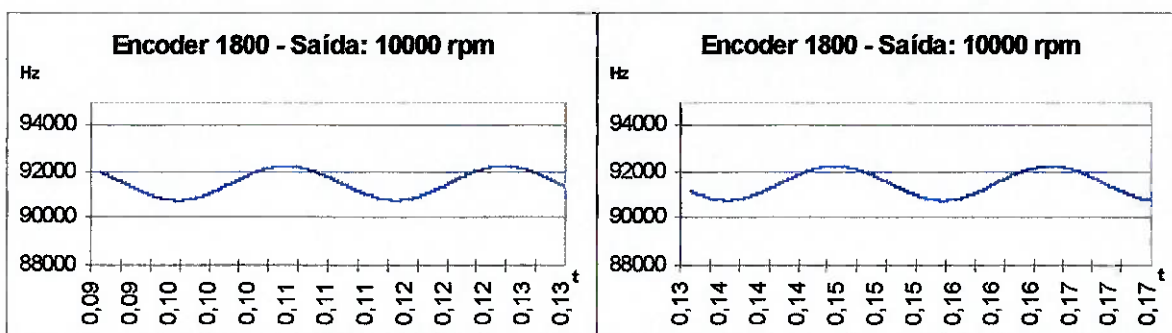


Figura III.22 - Vibração torcional a 10.000 rpm (multiplicador) com a CHAVETA BOA

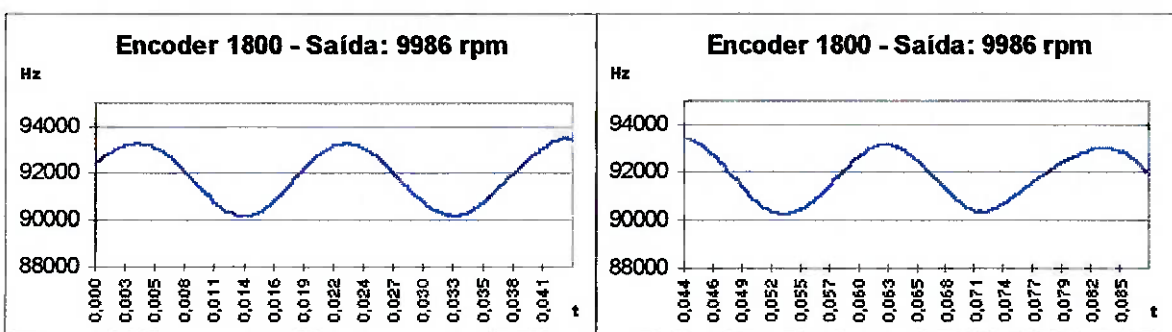


Figura III.23 - Vibração torcional a 10.000 rpm (multiplicador) com a CHAVETA RUIM

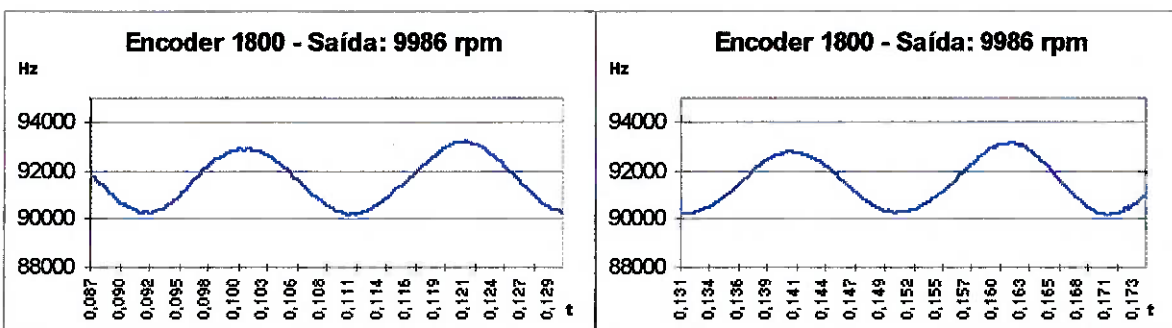


Figura III.24 - Vibração torcional a 10.000 rpm (multiplicador) com a CHAVETA RUIM

ANEXO IV

Vibração Torcional no Eixo de Entrada - 1800 pulsos x 1 pulso

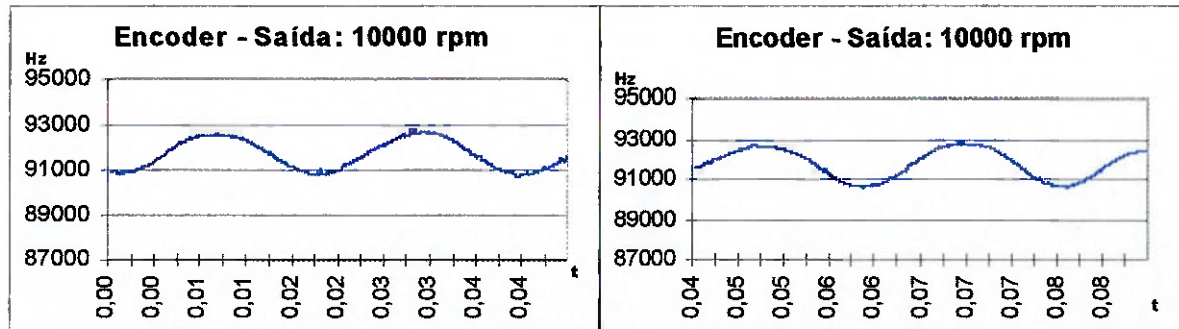


Figura IV.1 - Vibração torcional a 10.000 rpm - Eixo de entrada - 1800 pulsos/volta

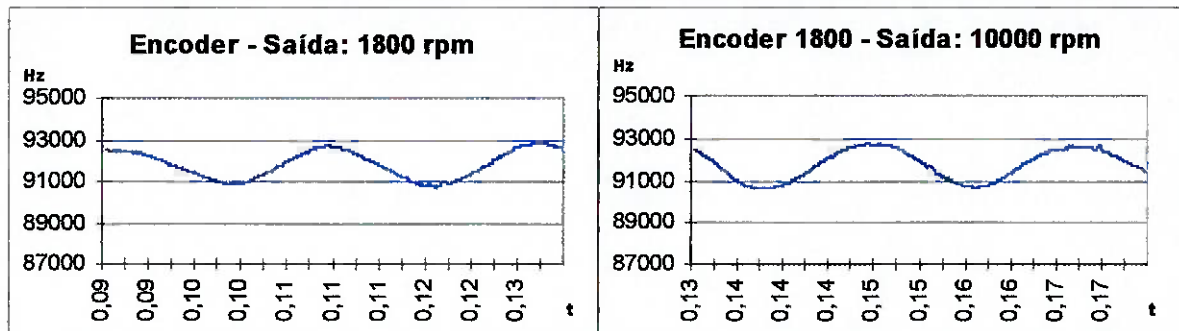


Figura IV.2 - Vibração torcional a 10.000 rpm - Eixo de entrada - 1800 pulsos/volta

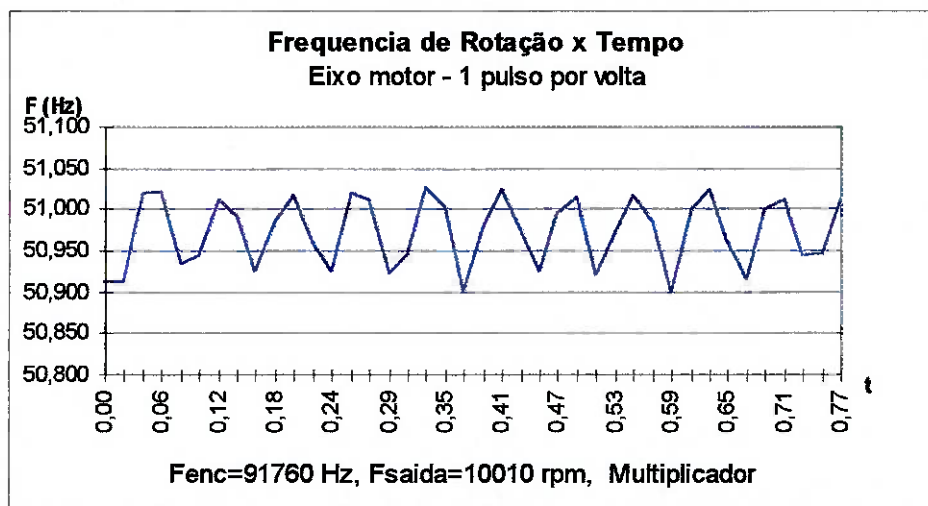


Figura IV.3 - Vibração torcional a 10.000 rpm - Eixo de entrada - 1 pulso/volta

ANEXO V

Comportamento Após Correção

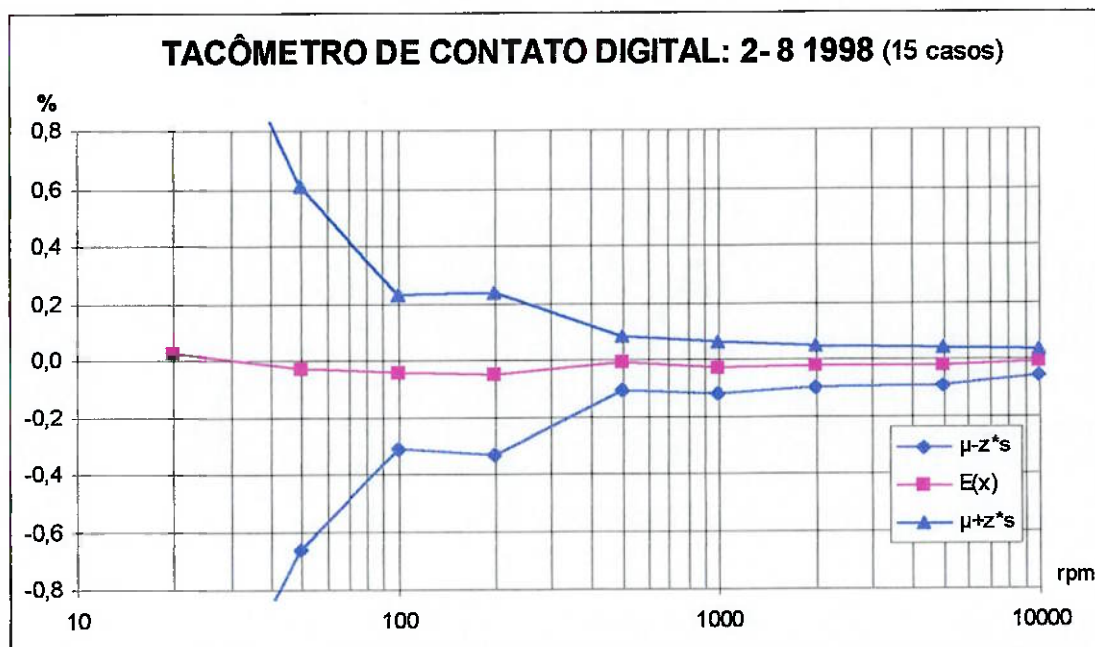


Figura V.1 - Distribuição dos resultados da calibração após a inversão da chave.

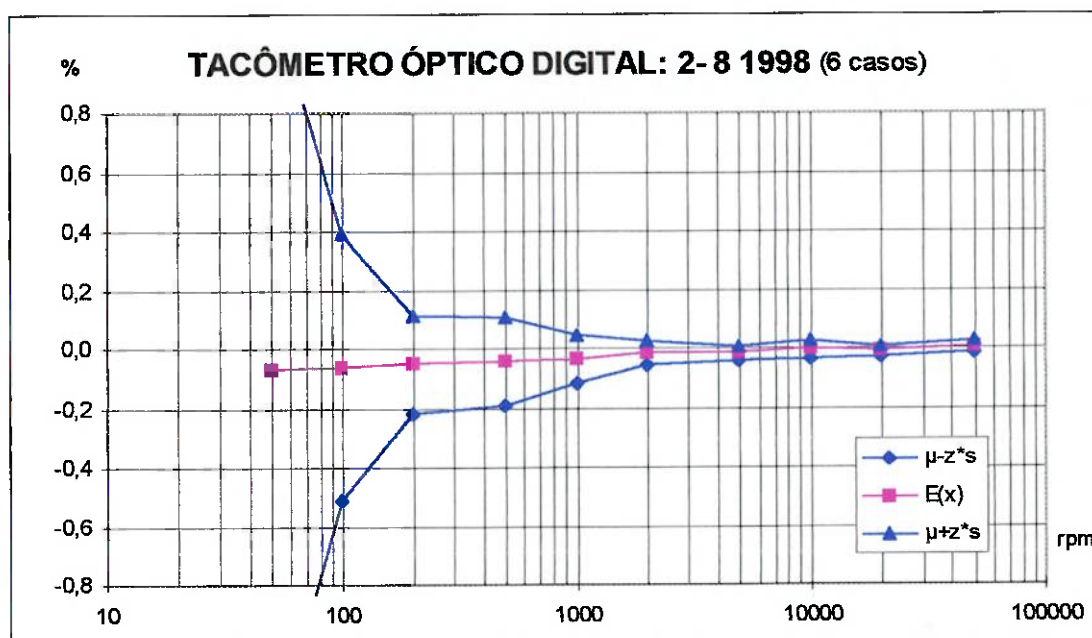


Figura V.2 - Distribuição dos resultados da calibração após a inversão da chave.

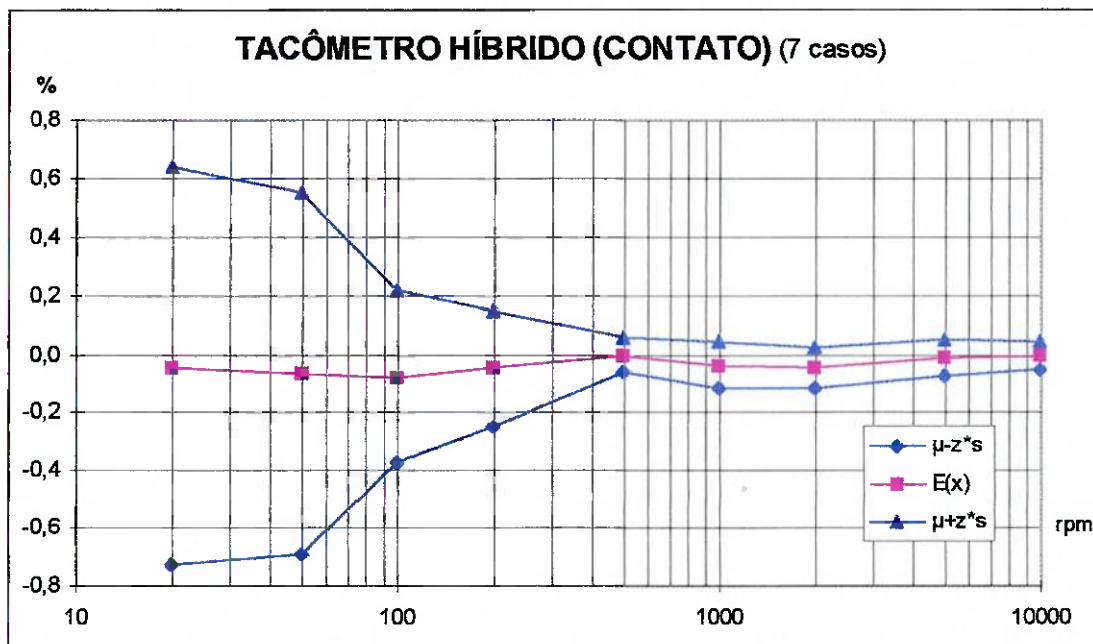


Figura V.3 - Distribuição dos resultados da calibração após a inversão da chave.

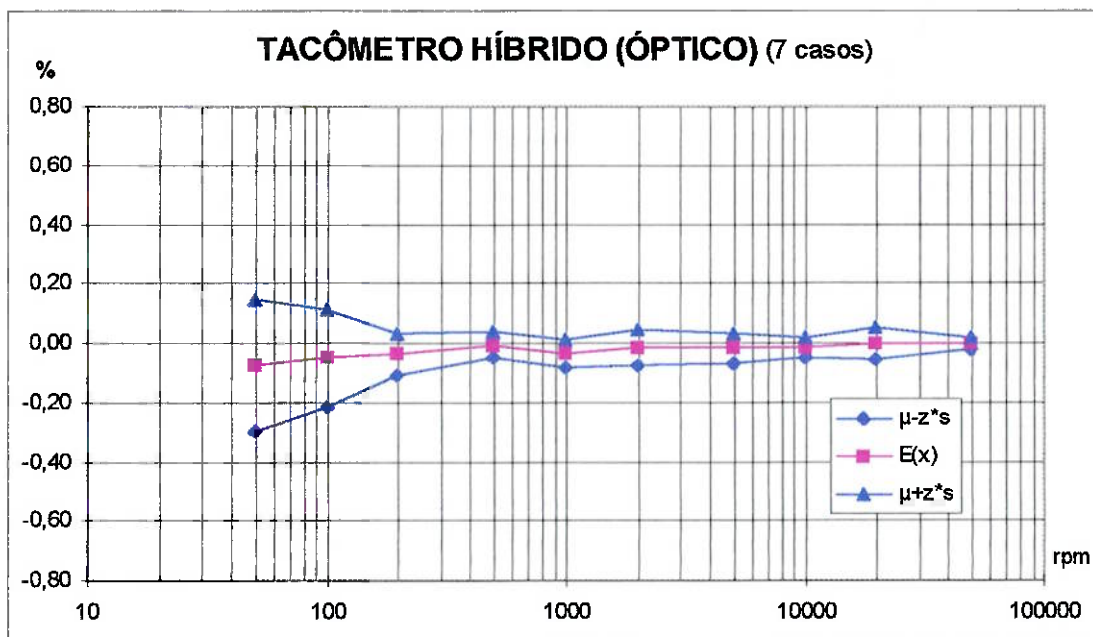


Figura V.4 - Distribuição dos resultados da calibração após a inversão da chave.

ANEXO VI

PARÂMETROS DE PROGRAMAÇÃO DO DINVERTER A

Tabela 1 - Modo Digital

Parâmetro	Valor	Comentário
0.00	0	Define o modo de segurança e habilita salvamento da configuração
0.01	0	Ajusta a velocidade mínima de rotação em 0 Hz
0.02	100	Ajusta a velocidade máxima de rotação em 100 Hz
0.03	5	Ajusta a taxa de aceleração em 5s / 100Hz
0.04	5	Ajusta a taxa de desaceleração em 5s / 100Hz
0.05	4	Define modo de controle via teclado
0.06	150	Limita a corrente em $150/100*[0.46]*[0.43]$
0.07	1	Modo de tensão para ampliação automática
0.08	0	Determina tensão de ampliação em $V_b=[0.08]/100*[0.44]/100$
0.09	1	Define relação tensão/frequência dependente da corrente de carga
0.10	Hz	Este parâmetro armazena a velocidade instantânea de rotação
0.11	0	Define velocidade pré rampa de aceleração/desaceleração
0.12	0	Define velocidade pós rampa de aceleração/desaceleração
0.13	$[0.43]*[0.46]$	Indica o valor da corrente que produz o torque no motor
0.14	1,5	Referência de velocidade de movimento lento
0.15	Std (0)	Ajusta modo de frenagem máxima
0.16	rP.l (2)	Modo de parada com trava após parada, seguido de desabilitação.
0.17	0	Controle de velocidade
0.20	0	Define velocidade a ser saltada
0.21	0	Define a banda ao redor da velocidade [0.20]
0.22	0	Define a segunda velocidade a ser saltada
0.23	0	Define a banda para a segunda velocidade
0.24	Ult (0)	Entrada de tensão de sinal na entrada analógica 1
0.25	...	Define função da entrada analógica 2
0.41	12 (3)	Frequência de chaveamento de 12 kHz
0.42	4P (1)	Número de pólos = 4
0.43	0,85	Fator de potência do motor
0.44	100	Tensão nominal (%)
0.45	0	Escorregamento de carga máxima
0.46	1,3	Corrente nominal do motor
0.47	60	Frequência nominal do motor

Tabela 2 - Modo Terminal

Parâmetro	Valor	Comentário
0.05	1	Define a entrada analógica 1 como referência de velocidade
6.04	2	Seleciona lógica com dois fios
0.00	900	Seleciona o modo de segurança
Obs : Os demais parâmetros são iguais ao modo Digital		

ANEXO VII

Descrição do Funcionamento do Sistema Automático de Aferição de Tacômetro

Requisitos:

Este projeto foi concebido com o intuito de idealizar um sistema que tivesse as seguintes qualidades ou requisitos:

1. O sistema tem que ser flexível o suficiente para possibilitar que o usuário possa automatizar a maioria das tarefas executadas utilizando o frequencímetro e o controle de rotação da bancada de tacômetro.
2. Aceite vários tipos de procedimentos de calibração, isto é, o software é capaz de se reconfigurar para fazer a calibração de diferentes tacômetros, ou procedimentos.
3. É capaz de configurar um contador e efetuar leituras neste mesmo equipamento, tudo remotamente e automatizado, sem a necessidade de intervenção do usuário.
4. Deve ter o controle de rotação da bancada, e também passar o controle dela para o usuário.
5. Tem que ser capaz de armazenar todos os dados fornecidos durante a execução do procedimento na forma de arquivo.

Decisões de projeto para atender aos requisitos:

Devido a flexibilidade exigida pelos requisitos achamos que a melhor forma de atendê-los foi a de criar uma espécie de “linguagem de comandos” para que o usuário possa escrever programas que interajam com os equipamentos (Frequencímetro e Controle de rotação da bancada), e um conjunto de comandos foi elaborado, para que, seguindo uma lógica, o usuário conseguisse obter um procedimento.

Após a criação do arquivo de procedimento, onde o usuário utilizasse de uma gramática para fazê-lo de maneira correta; o próximo passo é a execução deste arquivo de procedimento, o sistema leria este arquivo que contém uma série de comandos e cada

comando seria executado um por vez na sequência.

Um outro fator que achamos bastante interessante neste tipo de abordagem é que, quando você faz um procedimento de calibração, este procedimento serve como um documento da maneira pelo qual se decorreu a calibração, e a sequência de passos.

Descrição de Comandos

Notação sintática dos comandos:

Notação usada:

<...> indica obrigatoriedade

[...] indica que é opcional, ou não obrigatório

Formato geral:

<nome do comando>

ou <nome do comando> [complemento]

ou <nome do comando> <complemento>

Formato dos comandos:

Nome: AJUSTE_FREQUENCIA_REFERENCIA

Descrição: Ajusta o controle da bancada para uma dada frequência.

Sintaxe: <AJUSTE_FREQUENCIA_REFERENCIA> <frequência desejada>

Exemplo: AJUSTE_FREQUENCIA_REFERENCIA 100

Comentário: Ajusta a frequência em 100Hz

Nome: AMPLITUDE_PLACA_DSP

Descrição: Ajusta o controle da bancada para uma dada frequência.

Sintaxe: <AMPLITUDE_PLACA_DSP> <tensão desejada>

Exemplo: AMPLITUDE_PLACA_DSP 1,897

Comentário: Ajusta a amplitude em 1,897V

Nome: **DISPERSAO_MAXIMA**

Descrição: A “dispersão máxima” serve para estipular a maior dispersão admissível de uma leitura do frequencímetro, caso a dispersão máxima seja ultrapassada o sistema ignora a medida, e efetua uma nova medida.

Sintaxe: < DISPERSAO_MAXIMA > <valor dispersão>

Exemplo: DISPERSAO_MAXIMA 2,5

Comentário: Ajusta a dispersão máxima em 2,5%

Nome: **ESPERA**

Descrição: Faz uma pausa na execução do sistema, serve para esperar algum dispositivo que seja lento.

Sintaxe: < ESPERA > <valor em segundos>

Exemplo: ESPERA 2,5

Comentário: Faz uma pausa na execução de 2,5s

Nome: **GPIB_GRAVACAO_FREQUENCIMETRO**

Descrição: Envia comandos GPIB para o Frequencímetro

Sintaxe: < GPIB_GRAVACAO_FREQUENCIMETRO > <comando GPIB>

Exemplo: GPIB_GRAVACAO_FREQUENCIMETRO *RST

Comentário: Este comando reseta o frequencímetro

Nome: **GPIB_LOCAL_FREQUENCIMETRO**

Descrição: Coloca o frequencímetro para uso local, pelo operador

Sintaxe: < GPIB_LOCAL_FREQUENCIMETRO >

Exemplo: GPIB_LOCAL_FREQUENCIMETRO

Nome: **GRAVE_DISPERSAO_REFERENCIA**

Descrição: Coloca a dispersão de referência na saída (diferença entre as medidas máxima e mínima)

Sintaxe: < GRAVE_DISPERSAO_REFERENCIA >

Exemplo: GRAVE_DISPERSAO_REFERENCIA

Nome: GRAVE_ESCALA

Descrição: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada, ou envia uma mensagem que foi passada por parâmetro para a coluna da “Escala”.

Sintaxe: < GRAVE_ESCALA > [mensagem]

Exemplo: GRAVE_ESCALA

Comentário: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada e enviada

para a coluna da “Escala”

Exemplo: GRAVE_ESCALA 1000 rpm

Comentário: Grava “1000rpm” na coluna da “Escala”

Nome: GRAVE_FREQUENCIA_NOMINAL

Descrição: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada, ou envia uma mensagem que foi passada por parâmetro para a coluna da “Frequência nominal”.

Sintaxe: < GRAVE_FREQUENCIA_NOMINAL > [mensagem]

Exemplo: GRAVE_FREQUENCIA_NOMINAL

Comentário: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada e enviada

para a coluna da “Frequência nominal”

Exemplo: GRAVE_FREQUENCIA_NOMINAL 1000 Hz

Comentário: Grava “1000Hz” na coluna da “Frequência nominal”

Nome: GRAVE_FREQUENCIA_REFERENCIA

Descrição: Grava a frequência lida no frequencímetro na coluna da “Frequência de referência”.

Sintaxe: < GRAVE_FREQUENCIA_REFERENCIA >

Exemplo: GRAVE_FREQUENCIA_REFERENCIA

Nome: GRAVE_FREQUENCIA_TACOMETRO

Descrição: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada, ou envia uma mensagem que foi passada por parâmetro para a coluna da “Frequência do tacômetro”.

Sintaxe: < GRAVE_FREQUENCIA_TACOMETRO > [mensagem]

Exemplo: GRAVE_FREQUENCIA_TACOMETRO

Comentário: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada e enviada

para a coluna da “Frequência de tacômetro”

Exemplo: GRAVE_FREQUENCIA_TACOMETRO 100 rpm

Comentário: Grava “1000 rpm” na coluna da “Frequência de tacômetro”

Nome: GRAVE_MENSAGEM_TODOS_ARQUIVOS

Descrição: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada, ou envia uma mensagem que foi passada por parâmetro para todas colunas.

Sintaxe: < GRAVE_MENSAGEM_TODOS_ARQUIVO > [mensagem]

Exemplo: GRAVE_MENSAGEM_TODOS_ARQUIVO

Comentário: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada e enviada

para todas colunas.

Exemplo: GRAVE_MENSAGEM_TODOS_ARQUIVO Primeira Medição

Comentário: Grava “Primeira Medição” em todas colunas.

Nome: LEITURA_CONTADOR

Descrição: Este comando faz a leitura do frequencímetro e atualiza a variável interna de Leitura, “frequência atual do frequencímetro, dispersão (maximo-minimo/média), desvio padrão”

Sintaxe: < LEITURA_CONTADOR >

Exemplo: LEITURA_CONTADOR

Nome: MENSAGEM_COM_PAUSA

Descrição: Envia uma mensagem para o usuário e espera que ele aperte um botão para continuar.

Sintaxe: < MENSAGEM_COM_PAUSA > [mensagem]

Exemplo: MENSAGEM_COM_PAUSA Troque a RELAÇÃO

Comentário: Envia a mensagem “Troque a RELAÇÃO” para o usuário e espera até que o usuário aperte o botão para continuar.

Nome: MENSAGEM_SEM_PAUSA

Descrição: Envia uma mensagem para o usuário e prossegue com a execução, sem esperar que pelo usuário.

Sintaxe: < MENSAGEM_SEM_PAUSA > [mensagem]

Exemplo: MENSAGEM_SEM_PAUSA Primeira Medição, 200 rpm

Comentário: Envia a mensagem “Primeira Medição, 200 rpm” para o usuário e continua com a execução.

Nome: PRECISAO_DA_AJUSTAGEM_DO_CONTADOR

Descrição: Atualiza uma variável de sistema que indica o menor erro admissível, esta variável é usada dentro do comando

“AJUSTE_FREQUENCIA_REFERENCIA”, indicando o quanto exato eu quero que a ajustagem seja feita. E o seu valor é dado em porcentagem.

Sintaxe: < PRECISAO_DA_AJUSTAGEM_DO_CONTADOR >

Exemplo: PRECISAO_DA_AJUSTAGEM_DO_CONTADOR 0,3

Comentário: Atualiza a variável de sistema de precisão de ajustagem para que o valor seja menor ou igual a 0,3 % da rotação desejada.

Nome: SUB_TITULO (T)

Descrição: Mostra uma mensagem na tela do usuário na área de “Sub-Título”

Sintaxe: < SUB_TITULO > [mensagem]

Exemplo: SUB_TITULO Primeira medição – Relação de Multiplicação

Comentário: Mostra a seguinte mensagem na área de sub-título na tela do usuário
“Primeira medição – Relação de Multiplicação”.

Nome: TITULO

Descrição: Mostra uma mensagem na tela do usuário na área de “Título”

Sintaxe: < TITULO > [mensagem]

Exemplo: TITULO Procedimento para leitura do Tacômetro modelo AT-900

Comentário: Mostra a seguinte mensagem na área de título na tela do usuário
“Procedimento para leitura do Tacômetro modelo AT-900”.

Nome: MENSAGEM_PARA_CABECALHO

Descrição: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada, ou envia
uma mensagem que foi passada por parâmetro para o cabeçalho dos dados
de saída.

Sintaxe: < MENSAGEM_PARA_CABECALHO > [mensagem]

Exemplo: MENSAGEM_PARA_CABECALHO Nome do Cliente:

Comentário: Grava “Nome do Cliente.” no cabeçalho.

Exemplo: MENSAGEM_PARA_CABECALHO

Comentário: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada e
enviada para o cabeçalho.

Nome: GRAVE_DESVIO_PADRAO_REFERENCIA

Descrição: Grava o desvio padrão da frequência lida no frequencímetro na coluna do
“Desvio Padrão”.

Sintaxe: < GRAVE_DESVIO_PADRAO_REFERENCIA >

Exemplo: GRAVE_DESVIO_PADRAO_REFERENCIA

Nome: AJUSTE_FREQUENCIA_MANUAL

Descrição: Este comando dá o controle para o usuário para que ele possa controlar o nível de tensão da saída da placa DSP, com isto ele pode controlar a rotação da mesa vibratória.

Sintaxe: < AJUSTE_FREQUENCIA_MANUAL >

Exemplo: AJUSTE_FREQUENCIA_MANUAL

Nome: MOSTRE

Descrição: Pede que o usuário entre com uma mensagem para ser digitada, ou envia uma mensagem que foi passada por parâmetro para o a tabela dos dados de saída.

Sintaxe: < MOSTRE > <linha> <coluna> [mensagem]

Exemplo: MOSTRE 0 2 Tac 1med. (rpm)

Comentário: Mostra na linha 0 e coluna 2 da tabela a mensagem “Tac 1med. (rpm)

Exemplo: MOSTRE 0 3

Comentário: Pede que o usuário entre com a mensagem para que seja mostrada na linha 0 e coluna 3.

Nome: MOSTRE_ESCALA

Descrição: Mostra na linha e coluna especificada, o valor da escala na tabela dos dados de saída.

Sintaxe: < MOSTRE_ESCALA > <linha> <coluna>

Exemplo: MOSTRE_ESCALA 0 2

Comentário: Mostra na linha 0 e coluna 2 da tabela a o valor da escala.

Nome: MOSTRE_FREQUENCIA_CALIBRADO

Descrição: Mostra na linha e coluna especificada, o valor da rotação do tacômetro na tabela dos dados de saída.

Sintaxe: < MOSTRE_FREQUENCIA_CALIBRADO > <linha> <coluna>

Exemplo: MOSTRE_FREQUENCIA_CALIBRADO 0 2

Comentário: Mostra na linha 0 e coluna 2 da tabela a o valor da rotação do tacômetro.

Nome: **MOSTRE_FREQUENCIA_NOMINAL**

Descrição: Mostra na linha e coluna especificada, o valor da frequência nominal na tabela dos dados de saída.

Sintaxe: **< MOSTRE_FREQUENCIA_NOMINAL > <linha> <coluna>**

Exemplo: **MOSTRE_FREQUENCIA_NOMINAL 0 2**

Comentário: Mostra na linha 0 e coluna 2 da tabela a o valor da frequência nominal.

Nome: **MOSTRE_FREQUENCIA_REFERENCIA**

Descrição: Mostra na linha e coluna especificada, o valor da frequência nominal na tabela dos dados de saída.

Sintaxe: **< MOSTRE_FREQUENCIA_REFERENCIA > <linha> <coluna>**

Exemplo: **MOSTRE_FREQUENCIA_REFERENCIA 0 2**

Comentário: Mostra na linha 0 e coluna 2 da tabela a o valor da frequência referência.

Nome: **COMENTARIO**

Descrição: Permite que o usuário entre com comentários dentro do arquivo de procedimento para que ele torne o sistema mais fácil de ser entendido.

Sintaxe: **< COMENTARIO > [mensagem]**

Exemplo: **COMENTARIO** Este é um comentário, você pode colocar qualquer coisa.

Um pouco da linguagem do LabVIEW

Antes de começar a explicar o funcionamento do sistema é interessante saber algumas das características da linguagem que o sistema foi desenvolvido.

Características, e detalhes:

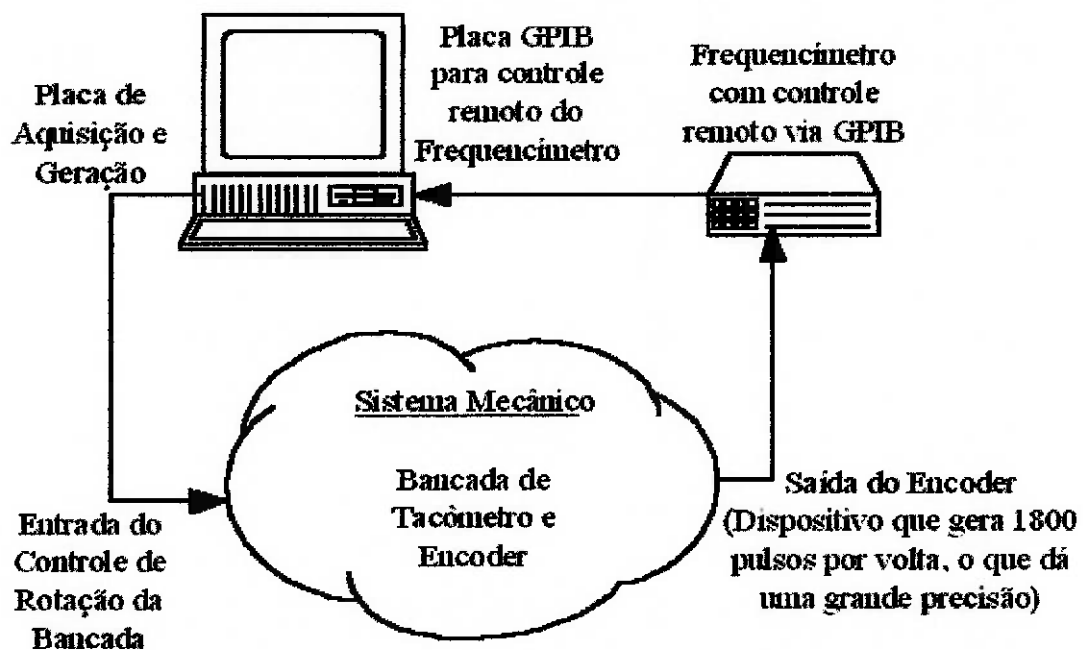
- Linguagem visual, de fácil manipulação
- É uma linguagem multitarefa (este aspecto foi usado em um ponto bem destacado dentro do projeto, no caso temos um processo coletando e apresentando informações ao usuário, e um outro processo que é

responsável pela execução do arquivo de procedimento)

- Tem suporte a placas de aquisição de dados e a vários instrumentos, inclusive com comunicação GPIB.
- Tem tratamento automático do tamanho das strings, (o usuário não precisa alocar espaço antes de usar uma string)
- Os programas rodam como em uma “rede de petri” e quando existirem dois ou mais tokens quando o sistema estiver sendo executado significa que dois ou mais processos estão concorrendo, ou é ativada a multitarefa. Isto acontece quando um fio se dividir em 2 ou mais caminhos.
- O nome mais correto desta linguagem é linguagem “G” de “grafics”

Descrição do Sistema Global

O sistema geral pode ser visto de maneira global através da figura abaixo:



O sistema usa duas tecnologias bastante interessantes, dentro do computador

existem duas placas:

- Uma **placa de aquisição e geração** de sinais, que é responsável pela geração dos sinais para o controlador de rotação da bancada de tacômetro. Este controle é disponibilizado para que o usuário tenha controle da bancada pelo próprio teclado.
- Uma **placa GPIB** (GPIB significa “General Purpose Interface Bus” ou interface de propósito geral), que tem um protocolo de comunicação (paralela através de blocos de oito bits ou um byte), para que os instrumentos que estiverem ligados ao computador, no caso o frequencímetro, possibilite um controle remoto.

O sistema como vimos, tem controle tanto da entrada quanto da leitura da saída do sistema, e isto permitiu que tenhamos implementado comandos tanto de controle manual da bancada, quanto controle automático.

Um **controle manual** é feito basicamente disponibilizando o teclado para que o usuário possa alterar o valor do nível de tensão de saída da placa de aquisição, e como consequência o usuário tem controle da bancada.

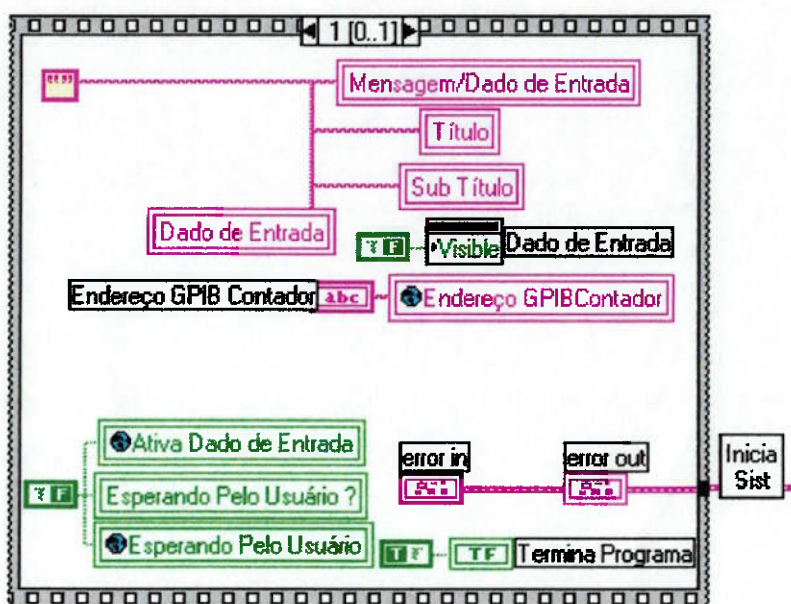
O **controle automático** funciona da seguinte forma: primeiramente o sistema aplica uma tensão no sistema mecânico, ele por sua vez responde com uma rotação que é lida pelo frequencímetro, e passada para o computador por intermédio da comunicação GPIB, e como o sistema é linear ele consegue atingir o valor desejado com poucas interações, mais uma ou duas tentativas.

Descrição do Funcionamento do Sistema de Software

Observação inicial: Um termo bastante usado nas explicações abaixo é “v.i.”, que significa “virtual instrument” ou instrumento virtual, que reúne um conjunto de funcionalidades tem uma similaridade com com as função em uma linguagem de programação mais usual.

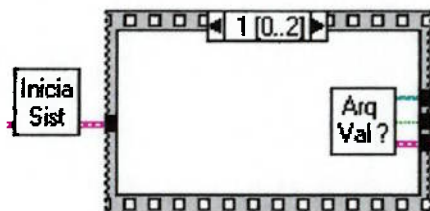
Funcionamento do v.i. principal

O sistema inicia o seu funcionamento inicializado todas as variáveis importantes do sistema

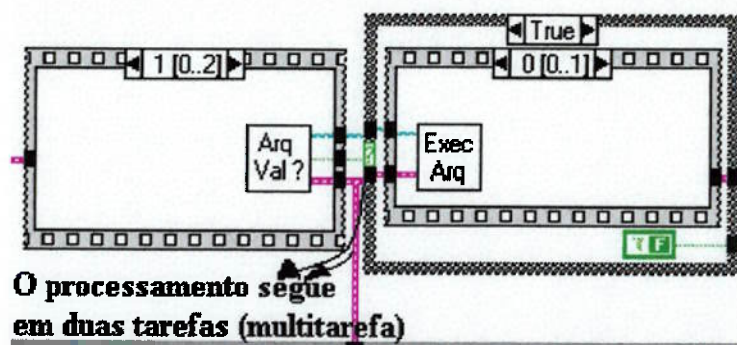


Em seguida o sistema inicia o "Frequencímetro" através do v.i. "Inicia Sist".

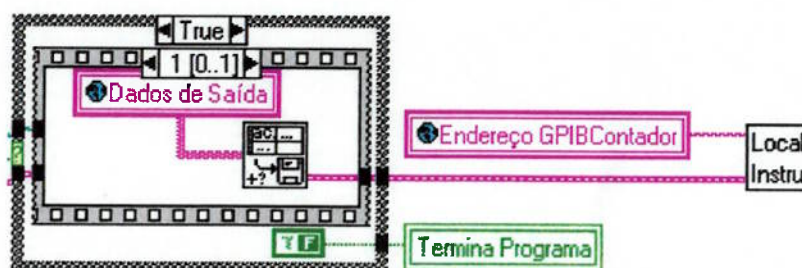
Com o sistema já inicializado, a próxima tarefa é pedir para o usuário indicar qual o arquivo de procedimento que ele deseja executar, que é feito pelo v.i. "Arq Val ?"



O v.i. "Arq Val ?" abre o arquivo de procedimento e checa se os comandos contidos dentro dele são comandos válidos, e se o usuário não esqueceu de colocar alguma parâmetro para os comandos que exigem



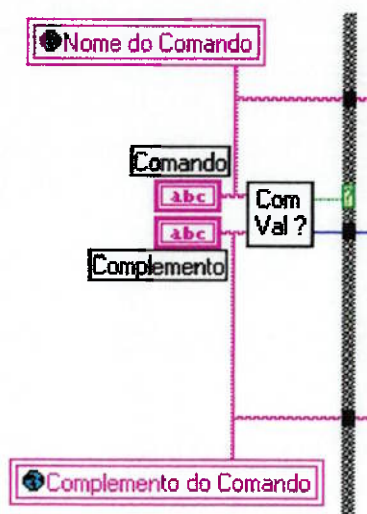
Como está indicado na figura, o processamento segue em duas tarefas distintas e concorrentes, o processamento agora está dividido, enquanto uma tarefa executa o arquivo de procedimento, comando por comando, através do v.i. “Exec Arq”, uma outra tarefa é executada buscando os dados que o usuário digita na interface e também da apresentação da interface.



Este trecho de programa mostrado acima, só é executado quando o v.i. que executa o arquivo de procedimento já estiver terminado a sua operação, e neste momento um outro v.i. passa a ser executado, que está mostrado acima, este v.i. salva a tabela de saída onde o procedimento escreveu os dados pertinentes ao procedimento que acabou de ser executado. Em seguida atualizamos a variável “Termina Programa” que indica a outra tarefa para parar que o sistema já executou o arquivo de procedimento, e logo a seguir o sistema coloca o frequencímetro para uso local através do v.i. “Local Instru”

Funcionamento do v.i. responsável pela execução de cada comando

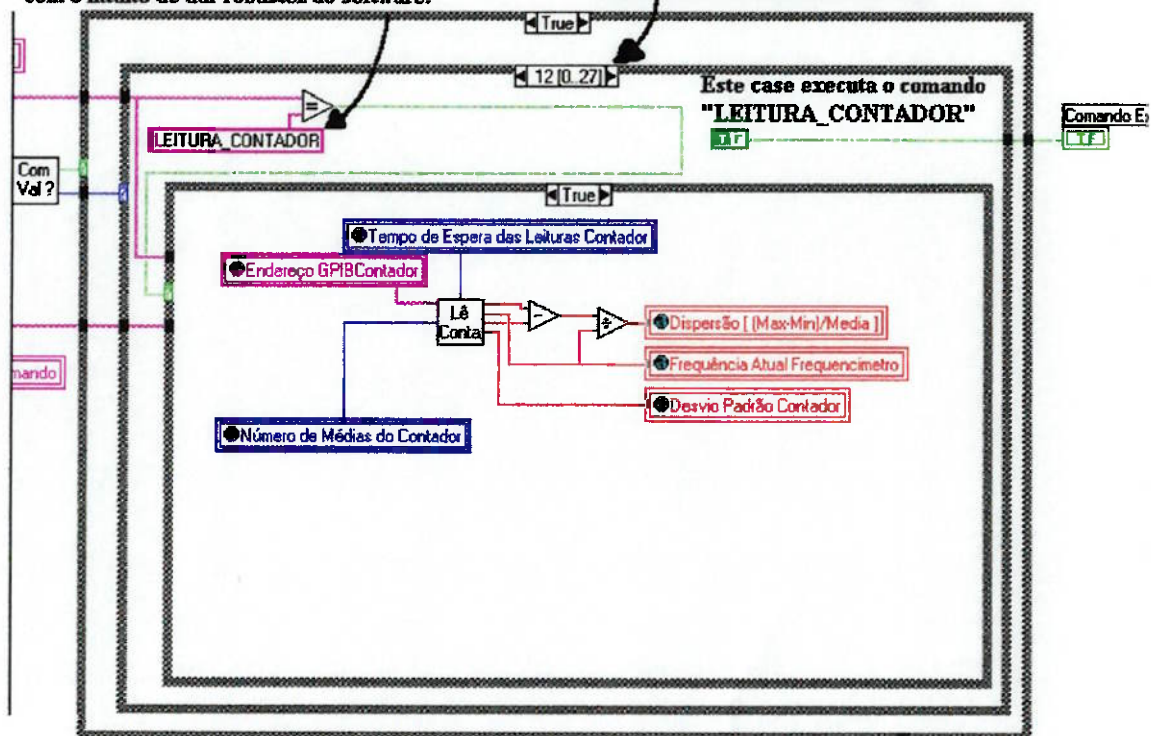
Este v.i. começa checando se o comando passado para ele é um comando válido, ou seja ele checa a sintaxe do comando passado e compara com a gramática aceita pelo sistema, ele faz isto com o auxílio de outro v.i., o “Com Val ?”, se o comando for válido, então ele passa a executar este comando.



A execução do comando é feita por uma estrutura “case”, onde cada case tem o papel de executar um comando, o sistema seleciona o case por um número que é cadastrado em um array.

Checa se o comando é realmente
 "LEITURA_CONTADOR", isto foi feito
 com o intuito de dar robustez ao software.

Conjunto de "estrutura CASE",
 cada "case" executa um comando



Anexo VIII - Planilha de Incerteza

Eixo Motor		N=20 rpm		Amostras: 10		Gate: 6 s	
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	N Médio
1	1955	1961	1950	0,57%		19,91	19,934
2	1961	1963	1959	0,17%		19,97	
3	1964	1966	1958	0,42%		20,00	
4	1950	1952	1948	0,22%	1,236	19,86	
5	1956	1958	1954	0,22%	1,285	19,92	

Eixo Saída		N=20 rpm		Amostras: 10		Gate: 6 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	e %	N Médio	Eixos
1	33	33	34	-1,90%		19,8468	0,334%	19,939	0,546%
2	33	34	33	1,20%		20,0676	-0,476%	Incerteza	Saída
3	33	33	33	0,57%		19,8924	0,534%	0,546%	0,517%
4	33	33	33	0,79%	0,0931	19,9332	-0,351%	E %	Total
5	33	33	33	0,71%	0,0674	19,9566	-0,172%	-0,028%	0,8%

Eixo Motor		N=50 rpm		Amostras: 20		Gate: 2 s	
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	N Médio
1	4908	4913	4905	0,18%	2,669	49,98583	49,962
2	4910	4921	4902	0,39%	4,055	50,00824	
3	4908	4913	4901	0,24%	3,332	49,9838	
4	4900	4907	4895	0,24%	3,171	49,91046	
5	4901	4907	4897	0,20%	2,56	49,91963	

Eixo Saída		N=50 rpm		Amostras: 20		Gate: 2 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	e %	N Médio	Eixos
1	83	83	83	0,15%	0,0365	50,00	-0,021%	49,953	0,066%
2	83	83	83	0,16%	0,0364	50,02	-0,017%	Incerteza	Saída
3	83	83	83	0,16%	0,0367	49,94	0,084%	0,064%	0,135%
4	83	83	83	0,21%	0,0483	49,88	0,060%	E %	Total
5	83	83	83	0,17%	0,0436	49,93	-0,024%	0,017%	0,15%

Eixo Motor		N=100 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	N Médio		
1	9819	9826	9812	0,14%	3,407	100,00	100,015		
2	9822	9828	9814	0,14%	4,002	100,03			
3	9819	9826	9812	0,14%	3,753	100,01			
4	9819	9823	9814	0,10%	2,792	100,01			
5	9821	9828	9816	0,12%	3,548	100,02			
Eixo Saída		N=100 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	e %	N Médio	Eixos
1	167	167	167	0,11%	0,050	100,02	-0,013%	100,003	0,048%
2	167	167	167	0,18%	0,071	100,00	0,038%	Incerteza	Saída
3	167	167	166	0,10%	0,045	99,94	0,065%	0,046%	0,046%
4	167	167	167	0,13%	0,064	100,02	-0,016%	E %	Total
5	167	167	167	0,12%	0,059	100,04	-0,013%	0,012%	0,07%

Eixo Motor		N=200 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s	
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	N Médio
1	19627	19631	19624	0,04%	2,056	199,90	199,975
2	19634	19639	19631	0,04%	2,235	199,98	
3	19636	19642	19633	0,04%	2,363	200,00	
4	19636	19641	19633	0,04%	2,159	200,00	
5	19636	19642	19632	0,05%	2,752	199,99	

Eixo Saída		N=200 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	e %	N Médio	Eixos
1	333	333	333	0,05%	0,033	199,93	-0,015%	199,982	0,015%
2	333	333	333	0,04%	0,035	199,96	0,009%	Incerteza	Saída
3	333	333	333	0,06%	0,050	199,99	0,003%	0,015%	0,024%
4	333	333	333	0,05%	0,037	200,04	-0,018%	E %	Total
5	333	333	333	0,06%	0,049	199,99	0,002%	-0,004%	0,03%

Eixo Motor		N=500 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s	
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	N Médio
1	49090	49096	49084	0,02%	3,284	499,99	499,953
2	49088	49091	49085	0,01%	1,835	499,97	
3	49085	49089	49080	0,02%	2,497	499,94	
4	49084	49091	49078	0,03%	3,086	499,93	
5	49083	49088	49077	0,02%	3,052	499,92	

Eixo Saída		N=500 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	e %	N Médio	Eixos
1	833	833	833	0,02%	0,042	499,97	0,004%	499,938	0,006%
2	833	833	833	0,02%	0,042	499,96	0,003%	Incerteza	Saída
3	833	833	833	0,01%	0,027	499,94	0,000%	0,005%	0,009%
4	833	833	833	0,02%	0,038	499,94	-0,001%	E %	Total
5	833	833	833	0,02%	0,046	499,88	0,009%	0,003%	0,011%

Eixo Motor		N=1000 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s	
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	N Médio
1	98177	98184	98172	0,01%	3,000	999,9	999,9
2	98168	98173	98164	0,01%	2,161	999,9	
3	98174	98176	98171	0,01%	1,537	999,9	
4	98173	98179	98169	0,01%	2,450	999,9	
5	98169	98173	98165	0,01%	2,129	999,9	

Eixo Saída		N=1000 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	e %	N Médio	Eixos
1	1666	1667	1666	0,01%	0,051	999,9	0,007%	999,898	0,006%
2	1666	1667	1666	0,01%	0,043	999,9	-0,003%	Incerteza	Saída
3	1667	1667	1666	0,01%	0,040	999,9	0,000%	0,006%	0,002%
4	1666	1667	1666	0,01%	0,037	999,9	0,003%	E %	Total
5	1667	1667	1666	0,01%	0,033	999,9	-0,005%	0,0002%	0,006%

Eixo Motor		N=2000 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	N Médio		
1	18334	18338	18325	0,07%	2,668	2000,0	1999,693		
2	18330	18337	18327	0,06%	2,345	1999,6			
3	18329	18335	18326	0,05%	2,156	1999,5			
4	18329	18333	18324	0,05%	2,170	1999,5			
5	18331	18336	18325	0,06%	2,734	1999,7			
Eixo Saída		N=2000 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	e %	N Médio	Eixos
1	3333	3333	3332	0,04%	0,337	1999,6	0,023%	1999,556	0,020%
2	3332	3333	3331	0,06%	0,675	1999,3	0,020%	Incerteza	Saída
3	3332	3333	3332	0,04%	0,393	1999,5	0,004%	0,018%	0,013%
4	3333	3334	3332	0,05%	0,444	1999,8	-0,014%	E %	Total
5	3333	3333	3332	0,03%	0,329	1999,7	0,002%	0,007%	0,024%

Eixo Motor		N=5000 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s	
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	N Médio
1	45829	45834	45824	0,02%	2,687	4999,5	4999,2
2	45828	45833	45825	0,02%	1,762	4999,4	
3	45826	45831	45821	0,02%	2,497	4999,2	
4	45825	45829	45819	0,02%	2,382	4999,1	
5	45822	45829	45815	0,03%	3,925	4998,8	

Eixo Saída		N=5000 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	e %	N Médio	Eixos
1	8332	8333	8332	0,02%	0,432	4999,5	0,000%	4999,357	0,005%
2	8332	8333	8331	0,02%	0,491	4999,4	0,000%	Incerteza	Saída
3	8333	8334	8332	0,02%	0,502	4999,6	-0,006%	0,004%	0,006%
4	8332	8333	8332	0,02%	0,482	4999,4	-0,007%	E %	Total
5	8332	8332	8331	0,02%	0,376	4998,9	-0,003%	-0,003%	0,008%

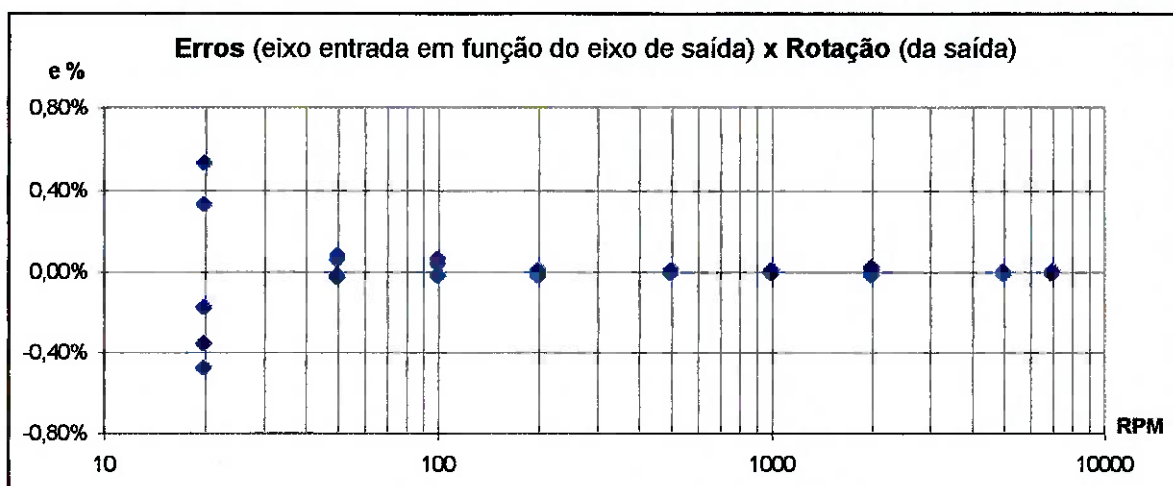
Eixo Motor		N=7000 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s	
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	N Médio
1	64162	64165	64158	0,01%	2,254	6999,4	6999,84
2	64163	64166	64158	0,01%	2,037	6999,6	
3	64165	64170	64161	0,01%	2,294	6999,9	
4	64168	64171	64165	0,01%	1,850	7000,2	
5	64168	64172	64164	0,01%	2,233	7000,2	

Eixo Saída		N=7000 rpm		Amostras: 20		Gate: 1 s			
n	Média	Max	Min	Flut. %	σ	N	e %	N Médio	Eixos
1	11666	11667	11665	0,01%	0,632	6999,7	-0,004%	6999,906	0,004%
2	11666	11668	11666	0,02%	0,610	6999,9	-0,004%	Incerteza	Saída
3	11667	11668	11666	0,02%	0,509	6999,9	-0,001%	0,004%	0,002%
4	11667	11668	11666	0,01%	0,435	6999,9	0,003%	E %	Total
5	11667	11667	11666	0,01%	0,417	7000,1	0,001%	-0,001%	0,005%

Resultados

Rotação	Bias	Incert.	Eixos	Flut. da saída	Total	Frequencímetr	Incerteza f
20	-0,028%	0,5%	0,5%	0,5%	0,8%	0,001%	0,8%
50	0,017%	0,06%	0,07%	0,13%	0,150%	0,001%	0,150%
100	0,012%	0,05%	0,05%	0,05%	0,07%	0,001%	0,07%
200	-0,004%	0,015%	0,015%	0,024%	0,03%	0,001%	0,03%
500	0,003%	0,005%	0,006%	0,009%	0,011%	0,001%	0,011%
1000	0,0002%	0,006%	0,006%	0,0023%	0,006%	0,001%	0,006%
2000	0,0068%	0,018%	0,020%	0,013%	0,024%	0,001%	0,024%
5000	-0,003%	0,004%	0,005%	0,006%	0,008%	0,001%	0,008%
7000	-0,0009%	0,004%	0,004%	0,0022%	0,005%	0,001%	0,005%

FAIXA	MAX.
20 a 50 RPM:	0,8%
> 100 RPM :	0,07%



Bias:	Erro médio entre os dois eixos, calculado como o erro entre a média dos cinco pontos no eixo de entrada com relação à média dos cinco pontos no eixo de saída.
Incert.:	Incerteza do erro médio entre os dois eixos, calculado como a dispersão dos cinco erros obtidos, considerando o eixo de saída como referência.
Eixos:	Incerteza devido à passagem de eixos, corresponde à soma vetorial do Bias com a Incerteza.
Flut. da saída:	Flutuação da velocidade no eixo de saída, considerada como ruído, calculada como a dispersão das cinco medidas no eixo de saída.
Total:	Incerteza mecânica total, corresponde à soma vetorial entre a Flutuação e a Incerteza devido à passagem de eixos.
Frequencímetro:	Incerteza do Frequencímetro HP 53131A.
Incerteza f:	Incerteza final, corresponde à soma da incerteza total com a incerteza do frequencímetro.

Bibliografia

- [1] Alan S. Morris, *Measurement and calibration for quality assurance*, Dept. of Control Engineering, University of Sheffield

- [2] J,H, Vuolo, *Fundamentos da Teoria de Erros*, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, Editor Edgard Blücher Ltda.

- [3] J,A, Sattary, *Expression of Uncertainty in Flow Measurement, Three day course*, Fluids and Process Technologies Division, NEL, East Kilbride, Glasgow.

- [4] H, W, Coleman, W, G, Steele Jr. *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, Mississippi State University, John Wiley & Sons.

- [5] P, L, O, Costa Neto, *Estatística*, Editora Edgard Blücher Ltda.

- [6] Microsoft Corporation, *Obtendo resultados com o Microsoft® Office para Windows® 95*, versão.

- [7] W, K, Wilson, *Practical Solution of Torcional Vibration Problems*, volume 1,2,3,4, Chapman & Hall Ltd.