

BENJAMIM MEDEIROS DE SOUZA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA MEDIÇÃO
AUTOMATIZADA DE POTÊNCIA MECÂNICA EM MOTORES
ELÉTRICOS DE ALTA ROTAÇÃO E BAIXO TORQUE**

Florianópolis

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Benjamim Medeiros de Souza Neto

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA
PARA MEDIÇÃO AUTOMATIZADA DE
POTÊNCIA MECÂNICA EM MOTORES
ELÉTRICOS DE ALTA ROTAÇÃO E BAIXO
TORQUE**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do grau de Mestre em Metrologia

Orientador: Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis, 17 de dezembro de 2009.

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA MEDIÇÃO AUTOMATIZADA DE POTÊNCIA MECÂNICA EM MOTORES ELÉTRICOS DE ALTA ROTAÇÃO E BAIXO TORQUE

Benjamim Medeiros de Souza Neto

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
“MESTRE EM METROLOGIA”**

**e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial**

**Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
ORIENTADOR**

**Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D

Prof. Hari Bruno Mohr, Dr. Eng.

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer Dr. Ing.

Eng. André Paz Rosa, M.Sc.

Agradecimentos

Em primeiro lugar aos meus pais, Mário e Sandra, e à minha irmã Franciane, pelo carinho e incentivo.

Ao Prof. Flesch pelos ensinamentos, pela confiança, competência e pelo exemplo de professor e pessoa.

Aos colegas do Labmetro, pelos conhecimentos compartilhados. Em especial ao Filipe, Carlos, Tobias e à Iara.

Aos colaboradores da Embraco, pela orientação técnica e apoio. Em especial ao Marco Aurélio, André, Milton e Aleandro.

À Embraco e à FINEP, pela oportunidade e pelo financiamento do projeto.

Resumo

O motor elétrico empregado tem significativa participação no desempenho operacional de um compressor de refrigeração. Para diminuir custos e aumentar desempenho, há constante trabalho de P&D em compressores. Atualmente, uma linha de pesquisa em compressores que se destaca é a que busca redução de tamanho e aumento da frequência de operação. Isso leva à necessidade de caracterização operacional de motores de baixo torque e alta frequência rotacional.

Torque e frequência rotacional são grandezas mecânicas que estão diretamente associadas ao desempenho de máquinas rotativas. Tais medições são utilizadas, tanto na fase de projeto, como na de controle de qualidade. Um bom conhecimento das características estáticas e dinâmicas do motor auxilia nas decisões de projeto dos demais componentes do compressor.

A inexistência no mercado de sistemas de ensaios adequados metrológica e operacionalmente para motores com tal aplicação, motivou a exploração do tema nesta dissertação. Foi proposto o desenvolvimento de um sistema automatizado para a medição indireta de potência mecânica, através do torque e da frequência rotacional, em motores de baixo torque e de alta rotação.

Realizou-se um estudo das diferentes tecnologias para a medição de torque e frequência rotacional com baixa incerteza. A partir das mais promissoras, fez-se a análise de adequação das alternativas disponíveis e a seleção e aquisição da instrumentação. Trabalho semelhante foi realizado para seleção dos módulos de aquisição de sinais e controle.

No âmbito deste trabalho foi desenvolvido, em LabVIEW, um sistema completo de ensaio automatizado e de medição e monitoramento das condições de alinhamento do motor na bancada, que apresentou desempenho operacional plenamente adequado ao objetivo proposto. A partir da avaliação das incertezas, comprovou-se que o sistema atingiu um comportamento metrológico muito superior aos requisitos estabelecidos.

Abstract

The electric motor plays an important role in the operating performance of a refrigeration compressor. In order to reduce costs and increase performance, a continuous work in R&D has been developed. Currently, a research line that stands out is the compressor size reduction through increase of the operating frequency. This leads to looking for motor characterization on low torque and high rotational frequency conditions.

Torque and rotational frequency are mechanical quantities that are directly related to the performance of rotating machines. These measurements are employed both in the design phase and in quality control. A good knowledge of the static and dynamic characteristics of the motor assists the design decisions of other compressor components.

The lack of commercial testing systems, metrologically and operationally suitable for electric motors in such application, led to the development of a dissertation on this topic. It was proposed to develop an automated system for mechanical power measurement of low torque and high speed motors through measuring their torque and rotational frequency.

Different technologies for measuring torque and rotational frequency with low uncertainty were studied. The most promising ones were analysed in terms of their suitability for the proposed system, leading to the selection and purchase of instrumentation. Similar work was carried out to select the modules for signal acquisition and control.

A complete automated test system, able to measure and monitor the motor alignment conditions on the bench, was developed in the scope of this work. The system, which was developed using LabVIEW, showed an operational performance quite suited to the proposed objective. From the evaluation of uncertainties, it was shown that the system reached a performance quite better than the established metrological requirements.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

1	Introdução	19
1.1	Contextualização	19
1.2	Objetivo do trabalho	20
1.3	Estrutura da dissertação	20
2	Revisão da literatura acerca da medição de potência mecânica em motores elétricos	22
2.1	Medição indireta de potência mecânica através de torque e frequência rotacional	22
2.2	Medição de torque	23
2.2.1	Medição indireta	25
2.2.1.1	Extensômetros de resistência (<i>strain gages</i>)	25
2.2.1.2	Sensores magneto-elásticos	27
2.2.2	Medição direta	27
2.2.2.1	Extensômetros	27
2.2.2.2	Sensores de ângulo de torção	28
2.2.2.3	Sensores baseados na tecnologia SAW	29
2.2.2.4	Sensores magneto elásticos com 2 faixas de polarização	30
2.2.3	Outras formas de transdução de torque	31

2.2.3.1	Medição através da variação da frequência rotacional	31
2.2.3.2	Medição através das características elétricas do motor	32
2.3	Medição de frequência rotacional	33
2.3.1	Tacogeradores	34
2.3.2	Tacômetros digitais	35
2.3.2.1	Sensores ópticos	36
2.3.2.2	Sensores indutivos	37
2.3.2.3	Sensores magnéticos (efeito Hall)	38
3	Desenvolvimento da bancada de ensaios	39
3.1	Requisitos	39
3.2	Seleção dos princípios de medição	40
3.3	Arquitetura estabelecida	41
3.4	Detalhamento da bancada	44
3.4.1	Aquisição de dados	44
3.4.1.1	Número de canais	44
3.4.1.2	Taxa de amostragem	44
3.4.1.3	Resolução	45
3.4.1.4	Frequência do contador	46
3.4.1.5	Seleção da placa de aquisição	47
3.4.2	Transdutor de torque	48
3.4.2.1	Princípio de funcionamento	48
3.4.2.2	Transformador diferencial	49
3.4.3	Acoplamentos mecânicos	50
3.4.4	Freio	50
3.4.5	Fonte de corrente contínua para controle do freio	51
3.4.6	Corpos de ensaio	52

3.4.7	Unidade de controle dos motores	53
3.4.7.1	Comutação <i>sensorless</i> (sem sensor)	54
3.4.7.2	Comutação de bloco	54
3.4.7.3	Comutação senoidal	55
3.4.8	Sistema de fixação	56
3.4.9	Sistema de medição de temperatura	56
4	Sistema de medição e monitoramento do alinhamento	59
4.1	Princípio de medição	59
4.2	Instrumentação utilizada	61
4.3	Ensaio de validação	62
4.4	Avaliação metrológica	63
5	Automação da bancada de ensaios	67
5.1	Aquisição automatizada de dados	67
5.1.1	Placas de aquisição com tecnologia FPGA	67
5.1.2	Interfaceamento RS-232	68
5.1.3	Interfaceamento GPIB	68
5.2	Desenvolvimento do software	69
5.2.1	Software embarcado	69
5.2.2	Software de controle	70
5.3	Controlador	73
6	Avaliação experimental da bancada de ensaios	75
6.1	Levantamento do comportamento metrológico	75
6.1.1	Incerteza na medição de frequência rotacional	76
6.1.1.1	Calibração do sistema de medição	76
6.1.1.2	Avaliação das incertezas	77

6.1.2	Incerteza na medição de torque	80
6.1.3	Incerteza na medição de potência mecânica	83
6.1.4	Influência do desalinhamento na medição de potência mecânica	85
6.2	Validação da bancada	86
7	Conclusões e propostas para futuros trabalhos	91
7.1	Conclusões	91
7.2	Propostas para futuros trabalhos	92
	Referências	94
	Apêndice A – Especificação dos sistemas de aquisição	98
	Apêndice B – Tabela comparativa dos transdutores de torque	99
	Apêndice C – Tabela comparativa das fontes para controle do freio	100
	Apêndice D – Fluxograma do software de controle	101
	Apêndice E – Balanço das incertezas	102
	Apêndice F – Gráficos com a avaliação da reprodutibilidade dos ensaios	112
	Anexo A – Certificados de calibração	127

Lista de Figuras

2.1	Princípio físico para a medição de torque	24
2.2	Medição indireta (1)	25
2.3	Circuito de ponte (2)	26
2.4	Extensômetros no eixo rotativo (1)	28
2.5	Sensor de ângulo de torção (óptico) (2)	28
2.6	Sensor SAW (3)	30
2.7	Sensor magneto elástico com duas faixas de polarização (4)	31
2.8	Curva de torque x frequência rotacional de um motor indutivo (5)	32
2.9	Tacogerador (6)	34
2.10	Tacômetro AC (2)	35
2.11	Técnicas de geração de pulsos ópticos (2)	36
2.12	Sensor de relutância variável	37
3.1	Arquitetura da bancada	41
3.2	Modelo 3D da bancada	42
3.3	Foto da bancada	43
3.4	Detecção de pulsos	46
3.5	Estrutura interna do transdutor de torque TMHS303 (7)	48
3.6	Freio de histerese Magtrol AHB-1	52
3.7	Sistema de fixação Magtrol AMF-1	57
3.8	Circuito Anderson <i>Loop</i>	58
4.1	Acoplamento Magtrol	60
4.2	Formas de desalinhamento	60

4.3	Efeito do desalinhamento vertical no acoplamento	61
4.4	Tela do software de medição e monitoramento do alinhamento.	62
4.5	Bancada de ensaios instrumentada para correlação	64
4.6	Curva de correlação	66
4.7	Curva de erro do sistema de visão	66
5.1	Tela das medições	71
5.2	Tela dos relatórios de medição	72
5.3	Resposta do sistema com um controlador PI	74
6.1	Curva de erro do sistema de medição	77
6.2	Composição das incertezas na medição de frequência rotacional	79
6.3	Composição das incertezas percentual	79
6.4	Fontes de incertezas do transdutor do torque	81
6.5	Composição das incertezas na medição de torque	82
6.6	Incerteza na medição de potência mecânica com torque de 500 mN.m	85
6.7	Análise da influência do desalinhamento	86
6.8	Ciclo de medição	87
6.9	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=96 mN.m e $\omega=15000$ rpm	90
D.1	Fluxograma do software de controle	101
F.1	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=96 mN.m e $\omega=15000$ rpm	112
F.2	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=80 mN.m e $\omega=15000$ rpm	112
F.3	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=64 mN.m e $\omega=15000$ rpm	113
F.4	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=48 mN.m e $\omega=15000$ rpm	113
F.5	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=32 mN.m e $\omega=15000$ rpm	113
F.6	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=16 mN.m e $\omega=15000$ rpm	113
F.7	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=143 mN.m e $\omega=10000$ rpm	114

F.8	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=119 mN.m e $\omega=10000$ rpm	114
F.9	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=96 mN.m e $\omega=10000$ rpm	114
F.10	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=72 mN.m e $\omega=10000$ rpm	114
F.11	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=48 mN.m e $\omega=10000$ rpm	115
F.12	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=24 mN.m e $\omega=10000$ rpm	115
F.13	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=172 mN.m e $\omega=2500$ rpm	115
F.14	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=153 mN.m e $\omega=2500$ rpm	115
F.15	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=134 mN.m e $\omega=2500$ rpm	116
F.16	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=115 mN.m e $\omega=2500$ rpm	116
F.17	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=96 mN.m e $\omega=2500$ rpm	116
F.18	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=76 mN.m e $\omega=2500$ rpm	116
F.19	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=497 mN.m e $\omega=3500$ rpm	117
F.20	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=415 mN.m e $\omega=3500$ rpm	117
F.21	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=333 mN.m e $\omega=3500$ rpm	118
F.22	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=251 mN.m e $\omega=3500$ rpm	118
F.23	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=169 mN.m e $\omega=3500$ rpm	118
F.24	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=87 mN.m e $\omega=3500$ rpm	118
F.25	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=497 mN.m e $\omega=2500$ rpm	119
F.26	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=420 mN.m e $\omega=2500$ rpm	119
F.27	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=344 mN.m e $\omega=2500$ rpm	119
F.28	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=267 mN.m e $\omega=2500$ rpm	119
F.29	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=191 mN.m e $\omega=2500$ rpm	120
F.30	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=115 mN.m e $\omega=2500$ rpm	120
F.31	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=497 mN.m e $\omega=1000$ rpm	120
F.32	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=420 mN.m e $\omega=1000$ rpm	120

F.33	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=344 mN.m e $\omega=1000$ rpm	121
F.34	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=267 mN.m e $\omega=1000$ rpm	121
F.35	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=191 mN.m e $\omega=1000$ rpm	121
F.36	Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=115 mN.m e $\omega=1000$ rpm	121
F.37	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=119 mN.m e $\omega=12000$ rpm	122
F.38	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=99 mN.m e $\omega=12000$ rpm	122
F.39	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=80 mN.m e $\omega=12000$ rpm	123
F.40	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=60 mN.m e $\omega=12000$ rpm	123
F.41	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=40 mN.m e $\omega=12000$ rpm	123
F.42	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=20 mN.m e $\omega=12000$ rpm	123
F.43	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=155 mN.m e $\omega=8000$ rpm	124
F.44	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=131 mN.m e $\omega=8000$ rpm	124
F.45	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=107 mN.m e $\omega=8000$ rpm	124
F.46	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=84 mN.m e $\omega=8000$ rpm	124
F.47	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=60 mN.m e $\omega=8000$ rpm	125
F.48	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=36 mN.m e $\omega=8000$ rpm	125
F.49	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=159 mN.m e $\omega=3000$ rpm	125
F.50	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=134 mN.m e $\omega=3000$ rpm	125
F.51	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=118 mN.m e $\omega=3000$ rpm	126
F.52	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=102 mN.m e $\omega=3000$ rpm	126
F.53	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=86 mN.m e $\omega=3000$ rpm	126
F.54	Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=70 mN.m e $\omega=3000$ rpm	126
A.1	Certificado de calibração do transdutor MT30– página 1	127
A.2	Certificado de calibração do MT30– página 2	128
A.3	Certificado de calibração do frequencímetro HP 5334B – página 1	129
A.4	Certificado de calibração do frequencímetro HP 5334B – página 2	130

Lista de Tabelas

3.1	Pontos de carga de um ensaio RF	39
3.2	Requisitos para placa de aquisição	47
3.3	Especificação do transdutor de torque Magtrol modelo TMHS303	49
3.4	Especificação do acoplamento	50
3.5	Características do freio histerese Magtrol modelo AHB-1	51
3.6	Principais características dos motores Maxon	53
3.7	Características do servo-amplificador DES/7010	55
3.8	Características do sistema de fixação AMF-1	56
6.1	Fontes de incertezas relativas à placa de aquisição	80
6.2	Especificações do transdutor de torque	80
6.3	Pontos de carga especificados para o motor Maxon de 150 W	88
6.4	Resultados de medição na rotação de 15000 rpm do motor Maxon de 150 W	88
6.5	Pontos de carga especificados para o motor Maxon de 400 W	89
6.6	Resultados de medição na rotação de 3500 rpm do motor Maxon de 400 W	89
6.7	Pontos de carga especificados para o protótipo	89
6.8	Resultados de medição em 12000 rpm do protótipo	90
A.1	Especificação das placas de aquisição	98
A.2	Especificações do módulo <i>Compact Fieldpoint</i> e seus módulos adicionais	98
B.1	Tabela comparativa dos transdutores de torque	99
C.1	Comparativo das fontes	100
E.1	Balanço das incertezas do SMMA no eixo Y	102
E.2	Balanço das incertezas do SMMA no eixo Z	102

E.3	Balanço das incertezas do transdutor de torque (1000 rpm)	102
E.4	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (1000 rpm)	103
E.5	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (1000 rpm)	103
E.6	Balanço das incertezas do transdutor de torque (2000 rpm)	103
E.7	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (2000 rpm)	103
E.8	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (2000 rpm)	103
E.9	Balanço das incertezas do transdutor de torque (3000 rpm)	103
E.10	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (3000 rpm)	104
E.11	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (3000 rpm)	104
E.12	Balanço das incertezas do transdutor de torque (4000 rpm)	104
E.13	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (4000 rpm)	104
E.14	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (4000 rpm)	104
E.15	Balanço das incertezas do transdutor de torque (5000 rpm)	104
E.16	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (5000 rpm)	105
E.17	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (5000 rpm)	105
E.18	Balanço das incertezas do transdutor de torque (6000 rpm)	105
E.19	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (6000 rpm)	106
E.20	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (6000 rpm)	106
E.21	Balanço das incertezas do transdutor de torque (7000 rpm)	106
E.22	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (7000 rpm)	106
E.23	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (7000 rpm)	106

E.24	Balanço das incertezas do transdutor de torque (8000 rpm)	106
E.25	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (8000 rpm)	107
E.26	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (8000 rpm)	107
E.27	Balanço das incertezas do transdutor de torque (9000 rpm)	107
E.28	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (9000 rpm)	107
E.29	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (9000 rpm)	107
E.30	Balanço das incertezas do transdutor de torque (10000 rpm)	107
E.31	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (10000 rpm)	108
E.32	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (10000 rpm)	108
E.33	Balanço das incertezas do transdutor de torque (11000 rpm)	108
E.34	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (11000 rpm)	109
E.35	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (11000 rpm)	109
E.36	Balanço das incertezas do transdutor de torque (12000 rpm)	109
E.37	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (12000 rpm)	109
E.38	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (12000 rpm)	109
E.39	Balanço das incertezas do transdutor de torque (13000 rpm)	109
E.40	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (13000 rpm)	110
E.41	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (13000 rpm)	110
E.42	Balanço das incertezas do transdutor de torque (14000 rpm)	110
E.43	Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (14000 rpm)	110
E.44	Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (14000 rpm)	110

E.45	Balço das incertezas do transdutor de torque (15000 rpm)	110
E.46	Balço das incertezas do sistema de medição de torque (15000 rpm)	111
E.47	Balço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (15000 rpm)	111

Lista de Abreviaturas

RF	rotação fixa
PF	potência fixa
SMMA	sistema de medição e monitoramento do alinhamento
EC	eletronicamente comutado
GPIB	<i>general purpose interface bus</i>
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
GUM	Guia para a Expressão da Incerteza de Medição
FM	faixa de medição
FPGA	<i>field programmable gate array</i>
USB	<i>universal serial bus</i>
FM	faixa de medição
SM	sistema de medição
SMP	sistema de medição padrão
CC	corrente contínua
CA	corrente alternada
BEME	Bancada de Ensaio de Motores Elétricos
LIAE	Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaio Aplicados à Refrigeração
Labmetro	Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC
SI	Sistema Internacional
PI	proporcional-integral
A/D	analógico para digital

1 Introdução

1.1 Contextualização

Uma das maiores exigências do mercado atual de máquinas e equipamentos é a eficiência energética. A potência mecânica é uma grandeza que influencia diretamente o rendimento de uma máquina elétrica.

A obtenção da curva de potência mecânica de um motor é de fundamental importância na comprovação da adequação para utilização em um sistema de refrigeração. Essa medição é utilizada para se ter um melhor conhecimento das características dinâmicas do motor e para auxiliar em decisões no projeto dos demais componentes do compressor.

A importância do tema cresce sobremaneira quando considerados produtos com características inovadoras em se tratando de compressores de refrigeração. Esse é o caso de compressores que empregam motores de muito baixo torque (até 500 mN.m) e que operam em altíssimas frequências rotacionais (até 15000 rpm) visando a miniaturização dos compressores.

Inúmeras soluções comerciais podem ser encontradas para a medição de torque e frequência rotacional em motores de baixo torque e alta frequência rotacional (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15). Essas soluções comerciais, porém, possuem diversas limitações; dentre elas:

- sistemas operacionalmente lentos;
- dificuldade de alteração do sistema de medição, devido à disponibilização somente na forma de pacote fechado;
- problemas de desalinhamento e vibração;
- incertezas de medição inaceitáveis para a aplicação prevista.

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo principal do projeto é o desenvolvimento de um sistema automatizado de medição de potência mecânica, com baixa incerteza, para um motor elétrico caracterizado por operar em altas frequências rotacionais e baixo torque. O sistema implementado deverá ser capaz de obter curvas de potência mecânica com grande confiabilidade nos resultados e mínima influência no funcionamento normal do motor, incluindo: bancada para as medições; software de aquisição, controle e tratamento dos dados; levantamento operacional e metrológico da bancada. Levando em consideração um estudo de caso junto à empresa líder mundial em desenvolvimento de compressores de refrigeração, foram estabelecidas as seguintes condições operacionais desejáveis:

- frequência rotacional de até 15000 rpm;
- torque máximo de 500 mN.m;
- potência mecânica de 20 a 785 W;
- incerteza máxima na medição de torque de 0,5% da faixa de medição;
- incerteza máxima na medição de frequência rotacional de 0,5% da faixa de medição;
- incerteza máxima na medição de potência mecânica de 1% para toda a faixa de medição;
- medições em ambiente laboratorial;
- sistema automatizado.

1.3 Estrutura da dissertação

Este documento está dividido em sete capítulos, na seguinte forma:

O documento inicia com o levantamento do estado-da-arte para a medição da potência mecânica, através do torque e da rotação. São analisados os principais métodos atualmente utilizados para a medição de torque e frequência rotacional com baixa incerteza. Por fim, são apresentados os métodos mais adequados para utilização na aplicação em questão.

No capítulo três são avaliados os sistemas comerciais para a medição de torque e frequência rotacional atualmente disponíveis. É realizada a comparação e seleção dos transdutores mais adequados.

O capítulo quatro relata todo o desenvolvimento da bancada de ensaios de motores elétricos. É feita a apresentação da arquitetura da bancada e o detalhamento da instrumentação utilizada. O sistema de medição e monitoramento do alinhamento, desenvolvido adicionalmente, também é exposto.

A automatização da bancada é relatada no capítulo cinco, onde são descritos os sistemas de aquisição e processamento de dados e os softwares de medição e controle desenvolvidos. Também é apresentado o desenvolvimento do controlador do ponto de carga.

No capítulo seis é feita a avaliação operacional e metrológica da bancada. São avaliadas as incertezas na medição de torque, frequência rotacional e potência mecânica. Ao final do capítulo é mostrada a avaliação metrológica do sistema de medição e monitoramento do alinhamento.

No capítulo sete são expostas as conclusões do trabalho, relacionando as principais vantagens e dificuldades inerentes ao desenvolvimento realizado e a relevância dos resultados obtidos. Também são apresentadas sugestões para futuros trabalhos.

2 Revisão da literatura acerca da medição de potência mecânica em motores elétricos

Torque, frequência rotacional e potência mecânica são variáveis mecânicas associadas com o desempenho de máquinas rotativas. A capacidade de quantificar exatamente essas grandezas é essencial para a determinação do rendimento de máquinas rotativas e também para o estabelecimento de regimes de operação que assegurem serviços longos e confiáveis. Com o auxílio das diversas tecnologias disponíveis no mercado é possível fazer a medição dessas grandezas. A medição da potência mecânica é utilizada tanto no projeto de novas máquinas quanto no desenvolvimento de novos componentes (16).

Neste capítulo estão apresentados os conceitos básicos e são descritos os principais métodos para a medição de torque, frequência rotacional e potência mecânica.

2.1 Medição indireta de potência mecânica através de torque e frequência rotacional

Devido à inexistência de um transdutor específico para medição de potência mecânica, a sua determinação usualmente é feita de forma indireta, através da medição de torque e frequência rotacional, conforme pode ser definido pela equação 2.1.

$$W = T\theta \quad (2.1)$$

onde:

W = trabalho mecânico;

T = torque;

θ = ângulo de torção.

O sentido em que o torque atua determina se o trabalho está sendo realizado pelo corpo ou se o corpo está recebendo trabalho. O trabalho realizado sobre o corpo pode ser percebido pelo aumento da energia cinética. Já o trabalho realizado pelo corpo causa uma desaceleração, conseqüentemente reduzindo a energia cinética (16). Trabalho e energia têm como unidade no Sistema Internacional (SI) o joule (J), sabendo-se que 1 J equivale 1 N.m.rad, onde radiano é adimensional.

A taxa com que o trabalho é realizado é definida como potência mecânica. Se um torque T age durante um intervalo pequeno de tempo Δt , durante o qual há um deslocamento angular $\Delta\theta$, um trabalho igual a $T\Delta\theta$ é realizado à taxa $T\Delta\theta/\Delta t$. Substituindo $\Delta\theta/\Delta t$ por ω , a potência mecânica pode ser determinada facilmente pela equação 2.2.

$$P = T \cdot \omega \quad (2.2)$$

onde:

P = potência mecânica;

T = torque;

ω = frequência rotacional.

2.2 Medição de torque

Há várias maneiras de se medir o torque. A grande maioria se baseia no princípio de que, se um material é submetido a uma torção, ele irá se deformar. A figura 2.1 ilustra essa situação.

A relação básica que descreve essa deformação em termos angulares está mostrada na equação 2.3:

$$\phi = \frac{T \cdot l}{G \cdot J} \quad (2.3)$$

onde:

ϕ = ângulo de torção;

T = torque;

l = comprimento do eixo;

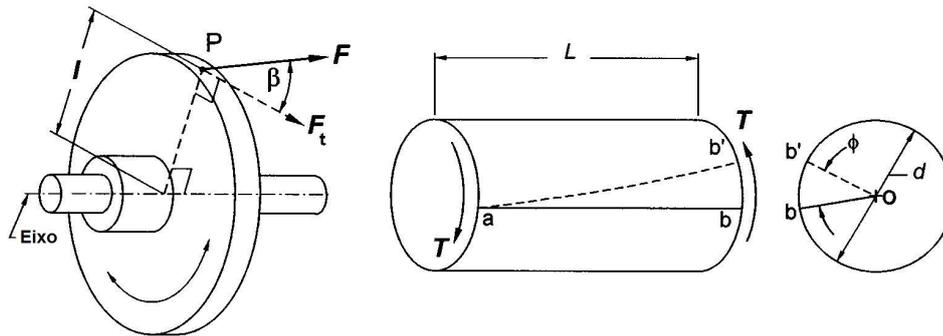
G = módulo de rigidez;

J = momento de inércia.

A tensão de cisalhamento (τ) de uma barra circular pode ser expressa pela equação 2.4 (17):

$$\tau = \frac{T \cdot \rho}{J}; \quad (2.4)$$

Através da equação 2.4 pode-se observar que a tensão de cisalhamento de uma barra circular é proporcional ao seu raio, sendo zero no centro e máximo na superfície da barra.



Legenda:

F – força

F_t – força tangencial

I – raio do disco

P – ponto de aplicação da força

L – comprimento da barra

T – torque

O – centro da barra (linha neutra)

d – diâmetro da barra

ϕ – ângulo de torção

a – ponto a (fixo)

b – ponto b (sem torção)

b' – ponto b após aplicado torque

Figura 2.1: Princípio físico para a medição de torque

Diversas formas de medição de torque podem ser encontradas na literatura. Tais métodos possuem diferentes fontes de incertezas, necessitando análise particularizada. Segundo as equações 2.3 e 2.4, o torque é proporcional ao ângulo de torção ou também à tensão superficial – que é convertida em deformação; portanto, basta conhecer o material e sua deformação para que se consiga medir torque. Há inúmeras formas de se fazer isso; tudo depende das condições impostas pela aplicação.

2.2.1 Medição indireta

Este método é baseado na medição da força de reação exercida na fonte ou absorvida por um elemento de máquina que está recebendo ou fornecendo torque (1), tendo como principal característica a permanência estática do sensor em relação ao sistema. O diagrama 2.2 mostra um leiaute básico para esse tipo de medição.

A figura 2.2 mostra que o torque de reação é responsável por manter o motor parado em relação ao processo em questão. Pode-se determinar o torque medindo, diretamente com um transdutor apropriado, ou indiretamente, através da força de reação F_r .

Atualmente as formas de transdução mais difundidas são (1, 4, 18, 19):

- medição da deformação através de extensômetros ou sensores piezoelétricos;
- medição de torção angular através de dispositivos ópticos ou magnéticos;
- medição de deformação através de sensores magneto-elástico (efeito Villari).

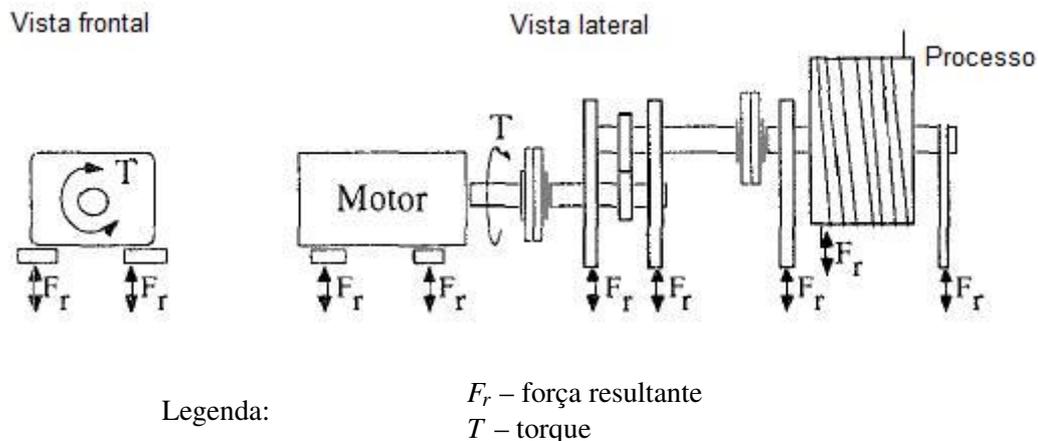


Figura 2.2: Medição indireta (1)

2.2.1.1 Extensômetros de resistência (*strain gages*)

É um sensor que, quando submetido a uma deformação, tem sua resistência elétrica alterada. Constituído basicamente por um resistor, metálico ou semicondutor, inserido em uma fina película. Para um extensômetro de resistência é válida a relação 2.5 (20):

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.5)$$

onde:

R = resistência elétrica;

ΔR = variação da resistência elétrica;

k = constante característica do extensômetro;

ε = deformação específica.

O torque pode ser determinado indiretamente através da equação 2.6 (17).

$$T = \frac{\varepsilon \cdot J \cdot G}{L} \quad (2.6)$$

onde:

T = torque;

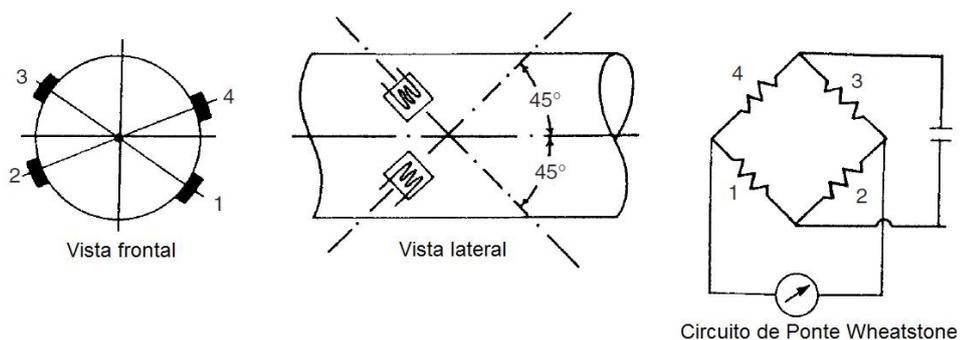
ε = deformação específica;

J = momento de inércia;

G = módulo de rigidez;

L = comprimento do eixo.

Devido a sua baixa sensibilidade, usualmente são utilizados circuitos de ponte de Wheatstone (21) para amplificação de seu sinal, conforme pode ser visto na figura 2.3.



Legenda:

R_u – resistência do extensômetro
 R_1, R_2, R_3 – resistências elétricas
 V_i – tensão de entrada
 V_o – tensão de saída

Figura 2.3: Circuito de ponte (2)

2.2.1.2 Sensores magneto-elásticos

Outra forma extremamente difundida para a medição de torque é através do uso de materiais magneto-elásticos (1, 4). Nesses materiais é observado o efeito Villari, que consiste na mudança da magnetização do material que acontece na direção de tensão aplicada. Existem materiais que apresentam um efeito Villari positivo e outros negativo. Ligas metálicas estruturalmente úteis que exibem o fenômeno são: níquel-ferro e níquel-cobalto.

Sendo aplicado torque a um eixo cujo material tenha esse comportamento específico, pode-se captar a variação da magnetização através de um indutor de captação.

Esse dispositivo é denominado *Torqductor*, e vem sendo bastante explorado na literatura (1). Não é necessário que o indutor de captação do sinal esteja fixo ao eixo, podendo o dispositivo medir torque com o eixo em movimento ou parado. Variações desse método podem ser exploradas para a melhoria da faixa de medição e transmissão para um receptor (no caso do eixo estar girando). Uma variante desse método será explorada na seção 2.2.2.

2.2.2 Medição direta

Esta classificação é dada aos transdutores fixados no eixo girante, também conhecido como método *in-line*, que convertem a deformação do eixo (proveniente do torque aplicado) em um sinal elétrico e o transmitem para um receptor fixo.

Dessa maneira, pode ser classificado como rotativo qualquer sensor que seja capaz de medir a deformação do eixo girante de uma forma direta, acompanhando o eixo.

2.2.2.1 Extensômetros

Strain gages fixados ao eixo é outra alternativa usualmente utilizada para medir torque através da deformação sofrida no eixo. Quando fixados ao eixo, é necessário utilizar alguma forma auxiliar de transmissão do sinal. Existem algumas formas de transmissão bastante utilizadas, dentre elas: transformadores elétricos e escovas de carbono (1). Um exemplo de transmissão de um sinal oriundo de um extensômetro e transmitido para um receptor fixo via transformador elétrico pode ser observado na figura 2.4.

Pode ser observado na figura 2.4 que os extensômetros em forma de ponte de Wheatstone são excitados por uma fonte de corrente alternada e o desbalanceamento pode ser medido pela diferença dos potenciais elétricos V_1 e V_2 .

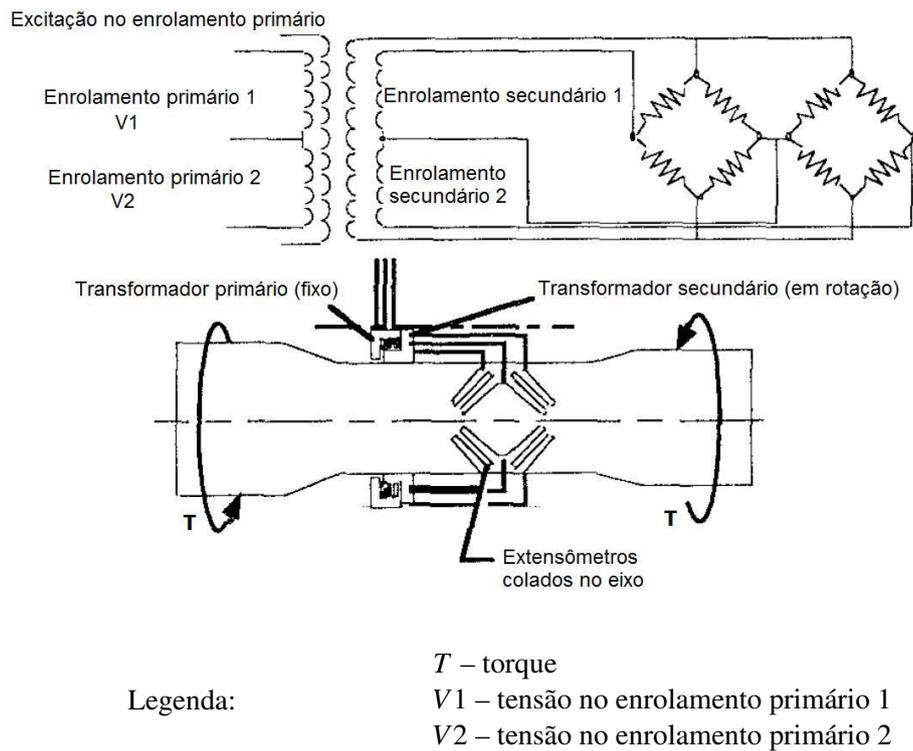


Figura 2.4: Extensômetros no eixo rotativo (1)

2.2.2.2 Sensores de ângulo de torção

Este tipo de sensor em conjunto com um dispositivo para contagem de pulsos (óptico ou indutivo) permite medir o ângulo de torção ao qual um eixo de comprimento L , com material conhecido, é submetido (2).

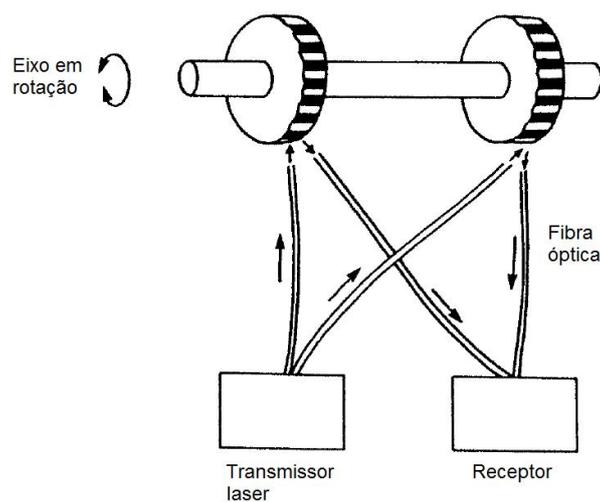


Figura 2.5: Sensor de ângulo de torção (óptico) (2)

Para um bom transdutor, é necessário que a roda tenha o maior número de faixas possíveis, conseguindo-se assim uma melhor resolução. Além do torque, esse dispositivo é capaz de medir

a rotação do eixo. A figura 2.5 mostra em forma esquemática um exemplo de um dispositivo óptico para a medição de torque.

O sistema óptico apresentado na figura 2.5 é composto de dois discos, cujas superfícies são listradas em preto e branco. Essas listras são responsáveis pela interrupção do sinal luminoso captado pelo sensor. A emissão e recepção de luz são feitas através de uma fibra óptica, o que confere a esse sistema excelente resposta dinâmica. Quando o eixo não está submetido a torque, os discos estão em fase e a luz emitida em ambos os discos é a mesma captada pelo receptor. Através do grau de defasagem entre os discos é determinado o torque aplicado. A relação torque versus defasagem pode ser descrita pela equação 2.7.

$$T = k.\phi \quad (2.7)$$

onde:

T = torque;

k = constante de proporcionalidade;

ϕ = defasagem entre os sinais.

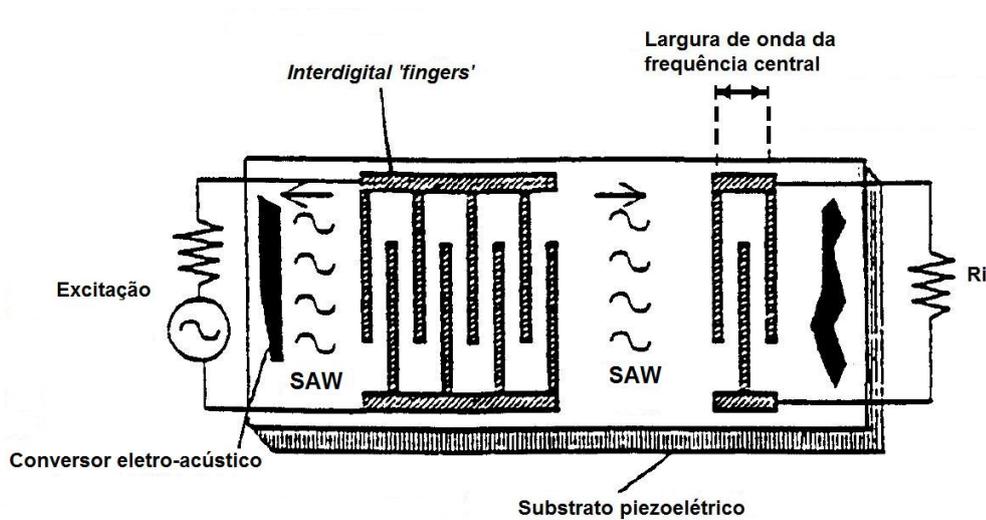
2.2.2.3 Sensores baseados na tecnologia SAW

Este tipo de sensor tem um comportamento muito semelhante ao dos extensômetros, sendo, porém, construído sobre um substrato piezoelétrico. Sua resposta em frequência é alterada de acordo com a tensão mecânica à qual o material é submetido. Esse comportamento se deve ao fenômeno SAW (*surface acoustic wave*) inerente ao material. Este sensor pode ser construído conforme mostrado na figura 2.6.

De acordo com a figura 2.6, a fonte de excitação pode ser oriunda de ondas eletromagnéticas. Torna-se necessária a construção de antenas de transmissão e recepção dos sinais. A tecnologia de construção desse dispositivo é a mesma de circuitos integrados.

Além do elemento sensor, é necessário o elemento "interrogador" e receptor para que o transdutor de fato seja consolidado. O "interrogador" e receptor são basicamente circuitos eletrônicos responsáveis por enviar um trem de pulsos eletromagnéticos ao sensor e receber a resposta contendo a informação de torque no eixo.

Um grande problema encontrado na utilização desse tipo de sensor é a sua deriva térmica (19). No entanto, essa limitação pode ser contornada posicionando outro sensor SAW, com



Legenda: R_i – impedância SAW

Figura 2.6: Sensor SAW (3)

características específicas para a medição de temperatura. As informações de ambos os sensores são recebidas pelo receptor e processadas, permitindo assim a compensação de temperatura.

Segundo Lonsdale (3), esse tipo de transdutor possui tipicamente as seguintes características metrológicas:

- resolução de 0,0001% da faixa de medição (FM);
- erro de linearidade de 0,1%.

Uma abordagem mais completa sobre esse tipo de sensor pode ser encontrada em (18, 19, 3).

2.2.2.4 Sensores magneto elásticos com 2 faixas de polarização

Sensores magneto-elásticos também podem ser utilizados para a medição de torque em eixos rotativos. Dispositivos mais eficientes já foram desenvolvidos para esse fim, como é o caso do sensor magneto elástico com duas faixas de polarização (4). Essa configuração pode ser observada na figura 2.7.

A partir dessa configuração é possível alcançar uma melhor sensibilidade, permitindo melhor relação sinal/ruído, o que possibilita a medição de baixos valores de torque. A captação do sinal pode ser feita por um sensor Hall.

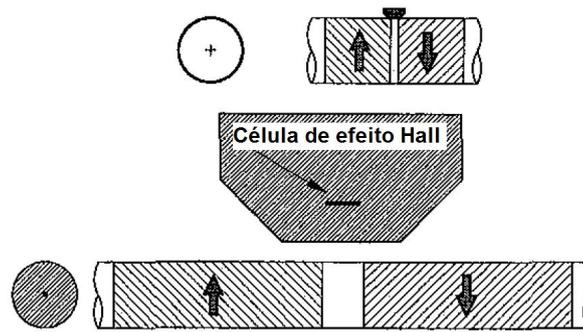


Figura 2.7: Sensor magneto elástico com duas faixas de polarização (4)

A faixa de medição e sensibilidade desejadas podem ser configuradas através do ajuste de parâmetros geométricos, como largura e profundidade, bem como a distância da célula de efeito Hall.

2.2.3 Outras formas de transdução de torque

Existem diversas outras formas de transdução do torque. Dentre essas, a seguir estão apresentadas as duas formas de medição que são mais amplamente utilizadas.

2.2.3.1 Medição através da variação da frequência rotacional

Uma maneira muito simples para a determinação do torque é através da medição da aceleração angular do eixo. A relação torque versus aceleração é descrita pela equação 2.8.

$$T = J \cdot \frac{\delta n}{\delta t} \quad (2.8)$$

onde:

T = torque;

J = momento de inércia;

n = frequência rotacional;

t = tempo.

Este método é limitado, devido à necessidade de haver variação na rotação, o que pode implicar não ser viável a sua utilização em algumas aplicações, como no caso da aplicação proposta nesse trabalho.

Na figura 2.8 é mostrada uma curva típica de torque versus frequência rotacional de um motor de indução (5) utilizando esse método.

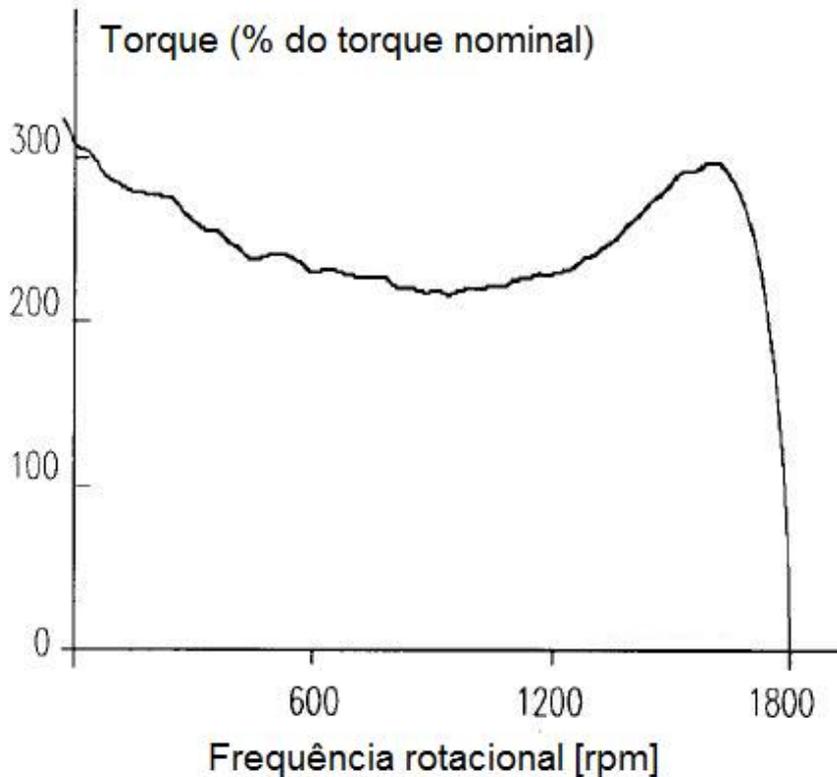


Figura 2.8: Curva de torque x frequência rotacional de um motor indutivo (5)

Através da figura 2.8 pode-se observar que após a estabilização da frequência rotacional do motor o método não é mais válido para a determinação do torque.

2.2.3.2 Medição através das características elétricas do motor

Outra forma para a obtenção do torque é indiretamente, a partir das características elétricas do motor. O torque pode ser determinado através da relação “torque x corrente”, fornecida no catálogo do fabricante.

Por exemplo, para um motor EC *brushless* fabricado pela Maxon (22), são fornecidas as relações 2.9 a 2.12.

$$P_{el} = P_J + P_{mec} \quad (2.9)$$

$$U \cdot I = R \cdot I^2 + \frac{1}{K_n \cdot K_m} \cdot M \cdot n \quad (2.10)$$

$$M = K_m \cdot I \quad (2.11)$$

$$n = K_n \cdot U \quad (2.12)$$

onde:

P_{el} = potência elétrica;

P_J = perdas devido o efeito Joule;

P_{mec} = potência mecânica;

U = tensão induzida no enrolamento;

I = corrente;

M = torque;

K_m = constante de torque;

n = frequência rotacional;

K_n = constante de frequência rotacional.

Com auxílio das constantes fornecidas pelo fabricante e do valor de corrente é possível determinar o torque fornecido pelo motor.

Devido às variações das características elétricas do motor ao longo do tempo, os resultados obtidos através deste método podem não ser confiáveis, podendo levar a incertezas muito elevadas, invalidando o resultado da medição.

2.3 Medição de frequência rotacional

Diversos métodos de medição para a medição de frequência rotacional são encontrados na literatura. Dentre eles, os mais largamente utilizados são os que utilizam tacogeradores e tacômetros digitais. A pesquisa acerca da medição de frequência rotacional para esse projeto se limitou a essas duas técnicas de medição.

2.3.1 Tacogeradores

A frequência rotacional pode ser medida através de geradores elétricos de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA) (23). Seu princípio de funcionamento baseia-se na interação entre um campo magnético fixo e uma bobina. Quando a bobina gira sob o campo magnético, uma força eletromotriz alternada é induzida na bobina. Quanto mais rápido a bobina girar maior será a amplitude da tensão. Assim, a frequência rotacional pode ser medida através da amplitude da tensão alternada (6).

Um tacômetro CC consiste basicamente de um enrolamento montado sob um campo magnético. Sua estrutura básica é idêntica à encontrada em geradores CC, como pode ser observado na figura 2.9. No entanto, certas características de projeto são otimizadas para um melhor funcionamento como instrumento de medição de frequência rotacional. Uma alteração significativa de projeto é a redução do peso do rotor, construindo enrolamentos em uma casca de fibra de vidro oca. O efeito dessa modificação é a minimização da carga sob o sistema a ser medido. A tensão de saída do sistema de medição é significativamente elevada, possuindo uma sensibilidade alta; tipicamente de 5 V por 1000 rpm (2). É usual a aplicação desse tipo de sensor para frequências rotacionais de até 10000 rpm e seu erro de máximo típico é de aproximadamente 1% da FM (6).

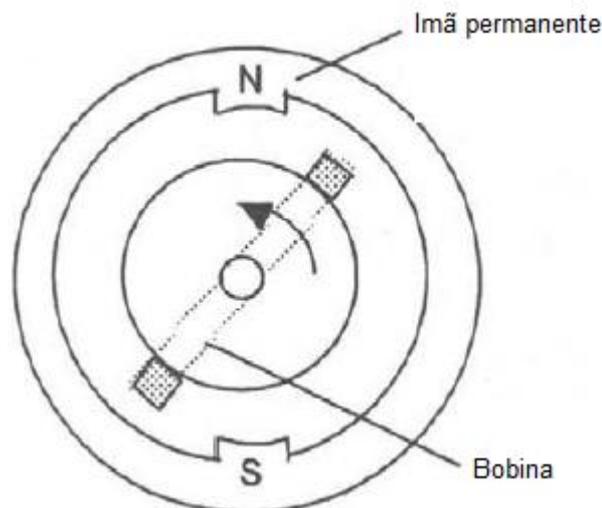


Figura 2.9: Tacogerador (6)

Um tacômetro CA tem uma tensão de saída proporcional à frequência rotacional. Sua estrutura mecânica possui a forma de um motor de indução bifásico, tipicamente com dois enrolamentos no estator e um rotor *drag-cup* (2), conforme mostrado na figura 2.10. Um dos

enrolamentos é alimentado por uma tensão alternada e no outro é medida a tensão induzida na saída. A tensão de saída do sistema de medição é zero se o rotor estiver parado e proporcional à frequência rotacional se estiver em movimento. O sentido de rotação pode ser determinado através da fase do motor, que muda 180° com a inversão do rotor. A faixa de medição típica para esse tipo de transdutor é de 0 a 4000 rpm, com um erro máximo de 0,05% da FM (2).

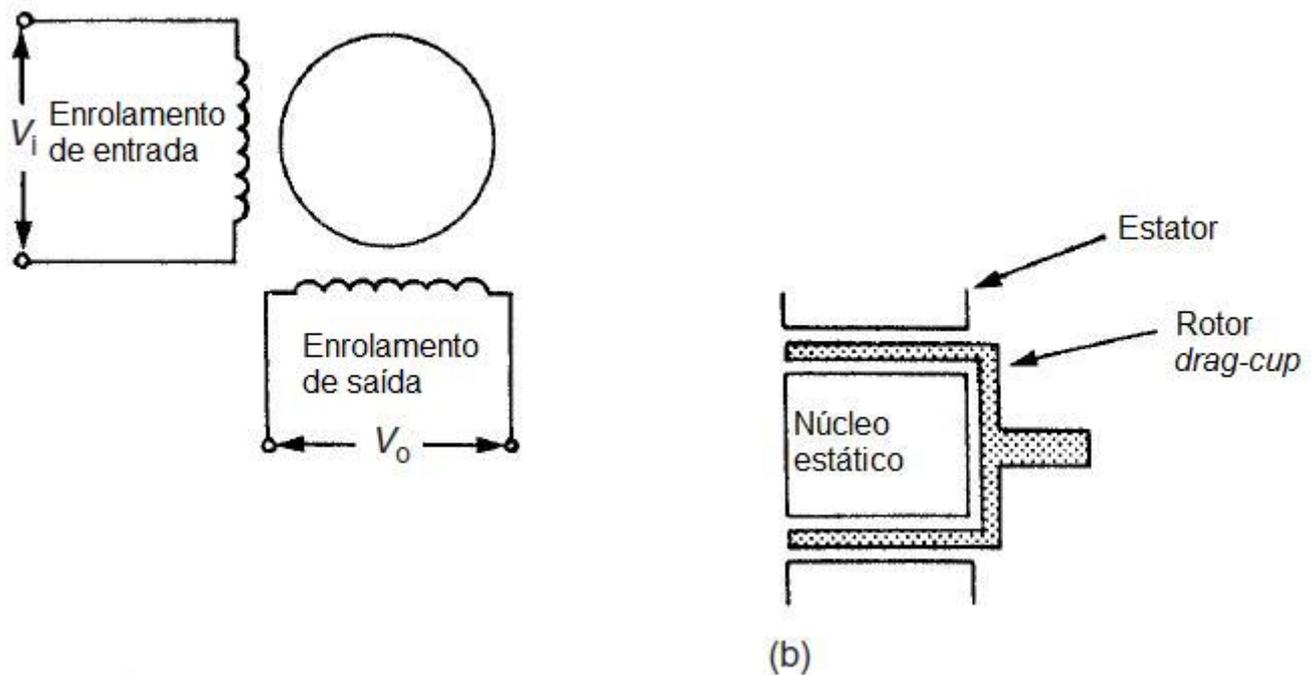


Figura 2.10: Tacômetro AC (2)

2.3.2 Tacômetros digitais

Tacômetros digitais são instrumentos sem contato, usualmente utilizados para detectar a passagem de marcas igualmente espaçadas na superfície de um disco girante ou eixo. Sua resolução é determinada pelo número de marcas ao longo da circunferência. Diversos tipos de sensores são usados, tais como óptico, indutivo e magnético. Quando uma marca é detectada, um pulso é gerado e enviado para um contador eletrônico de pulsos. A rotação instantânea pode ser calculada em cada instante de tempo que um pulso é gerado na saída. Em (2) é apresentado um circuito desse tipo, em que os pulsos oriundos do transdutor abrem a passagem de um trem de pulsos vindos de um *clock* e, em seguida, são registrados por um contador. Uma lógica de controle é responsável pela atualização do valor da saída digital, após a recepção de cada pulso vindo do transdutor. Para esse exemplo de medição, a resolução é satisfatória somente para baixas frequências rotacionais (2).

2.3.2.1 Sensores ópticos

Tacômetros com sensores ópticos são frequentemente conhecidos como *encoders* digitais. O transdutor é composto por um foto-emissor, um foto-detector e um disco.

Os pulsos ópticos podem ser gerados a partir da utilização de duas técnicas foto-elétricas. Na primeira, os pulsos são gerados através do bloqueio e desbloqueio da luz, a partir da passagem de um disco ranhurado entre a fonte de luz e o foto-detector. Na outra alternativa, o foto-emissor e o receptor estão dispostos no mesmo lado de um disco reflexivo com setores pintados em intervalos angulares regulares. Como fonte de luz utiliza-se, tipicamente, lasers e LED, como fotodiodos (fonte de luz), e fototransistores como detectores. Tacômetros ópticos possuem uma melhor resolução, refletindo em melhor exatidão, se comparados a outros tipos de *encoders* digitais. Porém, não são tão confiáveis quando utilizados em ambientes hostis, pois resíduos no ambiente podem bloquear ou distorcer a passagem de luz (2). As duas técnicas de geração de pulsos ópticos podem ser observadas na figura 2.11.

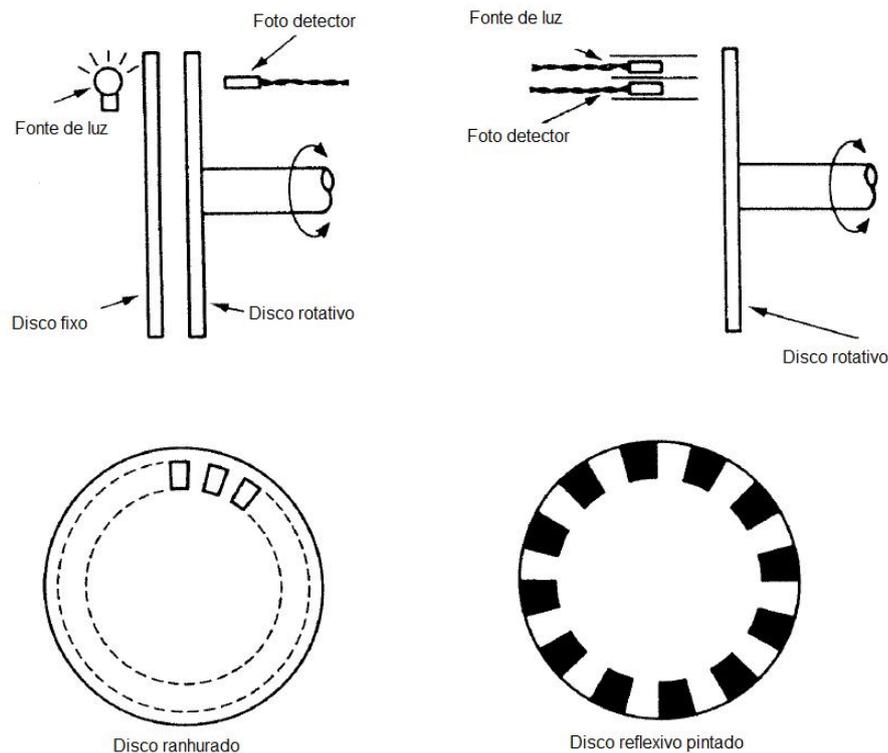


Figura 2.11: Técnicas de geração de pulsos ópticos (2)

2.3.2.2 Sensores indutivos

Transdutores de relutância variável são um tipo de tacômetro digital que utiliza o princípio indutivo para a detecção. Eles são largamente utilizados na indústria automotiva, devido a sua robustez. É constituído, basicamente, por uma bobina enrolada em um núcleo de material ferromagnético com um ímã fixo na base e um roda dentada (24, 2).

O princípio de funcionamento desse sensor baseia-se no princípio indutivo da lei de Faraday (24). A roda se movimenta próximo ao polo do ímã variando o fluxo magnético do sensor com a passagem de cada dente da roda, o que induz uma força eletromotriz na bobina. A figura 2.12 mostra os elementos básicos desse sensor.

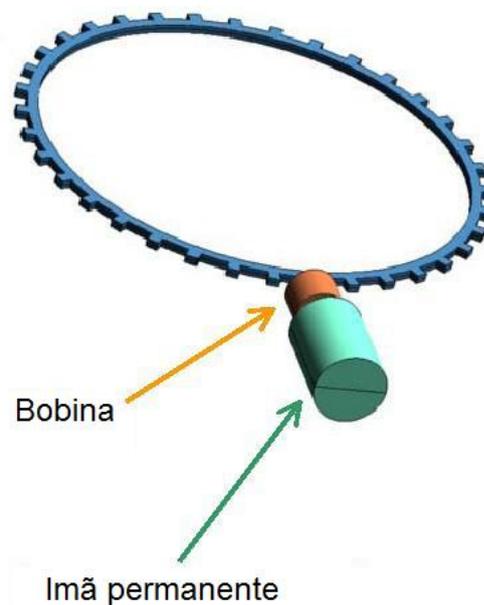


Figura 2.12: Sensor de relutância variável

A magnitude da força eletromotriz pode ser calculada considerando um circuito magnético formado por uma roda dentada e uma bobina enrolada sobre um ímã permanente. A força magnetomotriz é constante com o tempo e depende do tamanho do campo do ímã permanente. A relutância do circuito é dependente da distância entre a extremidade do dente e o pólo do magneto do sensor. Quando o dente está adjacente ao pólo do sensor a relutância é mínima, mas é aumentada com a movimentação do dente. A relutância é máxima quando o sensor está sobre a fenda, mas é diminuída com a aproximação do próximo dente ao pólo magnético (24).

A frequência rotacional da roda pode ser determinada pela amplitude ou frequência do sinal. No entanto, a medida da amplitude é mais suscetível a perturbações, tanto para efeitos de carga como para interferências elétricas, sendo assim a medida de frequência a mais utilizada

na prática (24).

2.3.2.3 Sensores magnéticos (efeito Hall)

Em sensores de efeito Hall, o elemento rotativo apresenta um *design* muito simples, na forma de uma roda dentada de metal. O sensor é de estado sólido - o dispositivo Hall - é colocado entre a roda dentada e um ímã permanente. Quando uma fenda entre dentes está adjacente ao sensor, o campo magnético total do ímã passa por ela. Depois, na aproximação do dente com o sensor, o dente desvia parte do campo magnético, reduzindo, assim, o campo através do sensor (2). Esse efeito faz com que o sensor produza uma tensão de saída proporcional à frequência rotacional da roda. A frequência rotacional pode ser obtida através da amplitude ou frequência do sinal.

A partir do material exposto neste capítulo, pôde-se ter um melhor entendimento das tecnologias disponíveis para a transdução de torque e frequência rotacional, o que auxiliou na escolha dos transdutores mais adequados a serem utilizados na bancada.

3 *Desenvolvimento da bancada de ensaios*

3.1 Requisitos

A bancada deve possibilitar a realização de dois tipos de ensaios dinâmicos: com rotação fixa (RF) ou potência fixa (PF). Nos ensaios RF, a frequência rotacional é fixada em diferentes níveis e, em cada um deles, são feitas medições em pontos de carga distintos. No caso do ensaio PF, a potência mecânica é fixada e, para cada patamar, são estabelecidos pontos de carga distintos, como é feito no método RF.

Para cada ensaio serão inicialmente especificados os pontos de carga desejados. Na tabela 3.1 são mostrados os pontos de carga de um ensaio RF.

Tabela 3.1: Pontos de carga de um ensaio RF

	Frequência rotacional [rpm]					
	15000	12500	10000	7500	5000	2500
Torque [mN.m]	96	115	143	159	162	172
	80	96	119	134	143	153
	64	76	96	108	124	134
	48	57	72	83	105	115
	32	38	48	57	86	96
	16	19	24	32	67	76

A temperatura externa do motor deve ser condicionada a um valor específico dependente do seu modelo, com o objetivo de submeter o motor sempre às mesmas condições térmicas, eliminando-se, assim, qualquer influência relacionada com a temperatura do motor. O procedimento de medição básico para um ensaio RF é descrito a seguir:

1. pré-aquecimento do motor até a temperatura de ensaio – de acordo com o modelo do motor;
2. inicialização do ensaio;

3. estabelecimento do primeiro ponto de frequência rotacional;
4. após a estabilização, ajusta-se os diferentes pontos de carga para cada patamar de frequência rotacional, em ordem descendente ou ascendente;
5. repete-se os itens 3 e 4 para os próximos níveis de frequência rotacional;
6. ao final, devem ser gerados dois relatórios, o primeiro com as medições realizadas durante o ensaio, e o outro, com os resultados das medições de torque, frequência rotacional e potência mecânica, metrologicamente avaliados.

Ao longo dos ensaios, deve-se monitorar o desalinhamento do sistema dentro dos níveis estabelecidos pelos fabricantes do transdutor de torque e acoplamentos, atentando-se a possíveis vibrações. Isso é necessário para garantir a confiabilidade dos dados e a integridade dos equipamentos.

3.2 Seleção dos princípios de medição

A escolha de um transdutor é de grande importância para o sucesso do sistema de medição, bem como o método de medição a ser utilizado.

Os transdutores *in-line* apresentam a vantagem de medirem o torque de maneira direta, isto é, são transdutores em contato direto com o elemento torsor. Apresentam ainda a vantagem de não haver contato mecânico que possa causar desgaste. No entanto, na maioria dos casos necessitam de um receptor *wireless* para que o sinal de medição possa ser recebido e tratado. O transdutor de ângulo de torção que utiliza o princípio indutivo se apresenta como uma opção bastante vantajosa, pois tem como característica alta resposta dinâmica, o que, nas medições dinâmicas, é um requisito imprescindível.

Para medição da frequência rotacional foram pesquisadas as principais tecnologias e métodos de medição. Por fim, chegou-se à conclusão de que o método mais adequado é o que utiliza *encoders* digitais, cujas principais vantagens são: alta resolução, baixa carga mecânica sob o sistema de medição, faixa de medição elevada.

3.3 Arquitetura estabelecida

A figura 3.1 representa esquematicamente a arquitetura da bancada de ensaios de motores elétricos. Ela é composta por diversos instrumentos, cada um dedicado à medição ou condicio-

namento dos sinais das grandezas de interesse do sistema de medição. Nas figuras 3.2 e 3.3 são mostrados, respectivamente, o modelo 3D e uma foto da bancada.

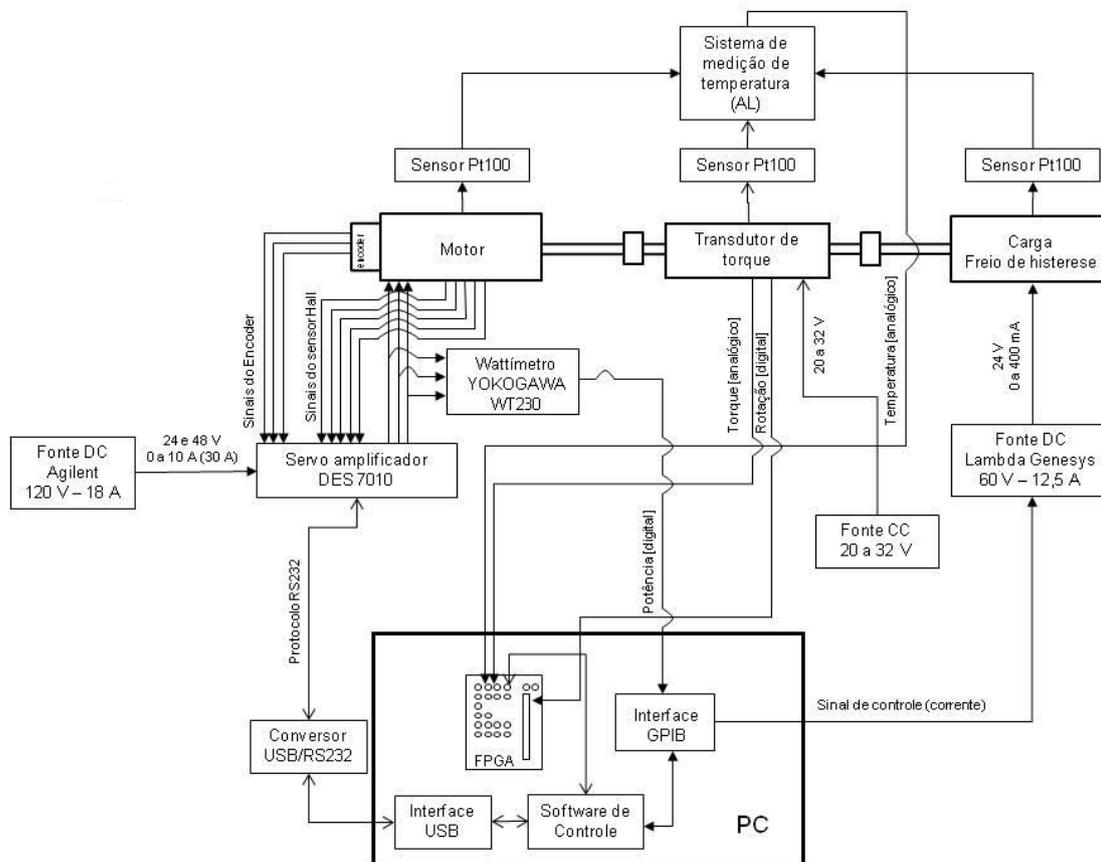


Figura 3.1: Arquitetura da bancada

O wattímetro WT230 é responsável pela medição das grandezas elétricas do sistema. Prevê-se que, em trabalhos futuros – existe uma dissertação em andamento acerca desse tema –, a bancada será capaz de medir também o rendimento de motores elétricos de alta rotação e baixo torque com baixa incerteza. Neste trabalho, o wattímetro foi utilizado para que se tivesse uma ideia qualitativa do rendimento dos motores.

Sensores Pt100 são utilizados para medição de temperatura (25). Para o condicionamento dos sinais utilizou-se a topologia de condicionamento de sinais proposta por Karl Anderson (26).

O sinais de torque e frequência rotacional são medidos em um mesmo sistema, constituído por um *encoder* e um transdutor indutivo de torque.

Motores eletronicamente comutados, são utilizados como corpo de prova para a validação da bancada. Para o acionamento dos motores é utilizado um servo-acionamento eletronicamente

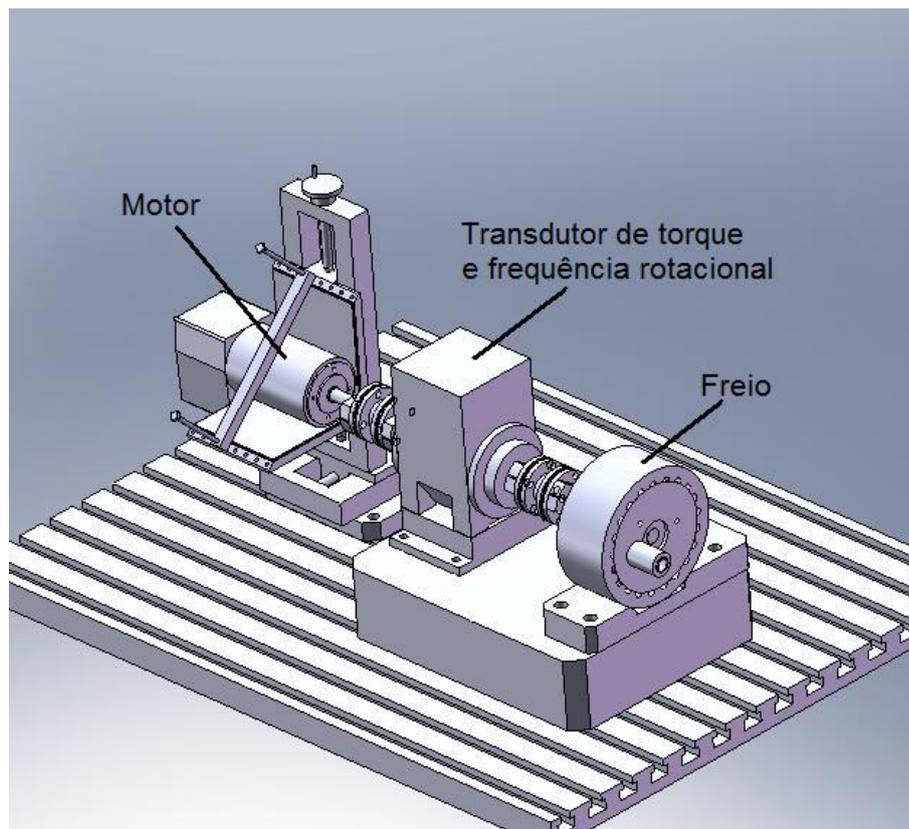


Figura 3.2: Modelo 3D da bancada

comutado (EC).

Como gerador de carga mecânica é utilizado um freio magnético de histerese (27).

A aquisição e pré-processamento dos dados é realizado por um sistema *field programmable gate array* (FPGA) (28) de aquisição de dados. O processamento, armazenamento e apresentação dos dados são feitos no computador por um software de controle desenvolvido através do LabVIEW (29).

A comunicação entre os equipamentos é realizada utilizando-se dois tipos de interface de comunicação:

- *general purpose interface bus* (GPIB): regulagem dos parâmetros da fonte e medição das grandezas elétricas da carga (freio de histerese) e da alimentação do motor, além da configuração dos parâmetros do wattímetro;
- RS-232 com conversor *universal serial bus* (USB): regulagem dos parâmetros e controle de frequência rotacional do servo amplificador.

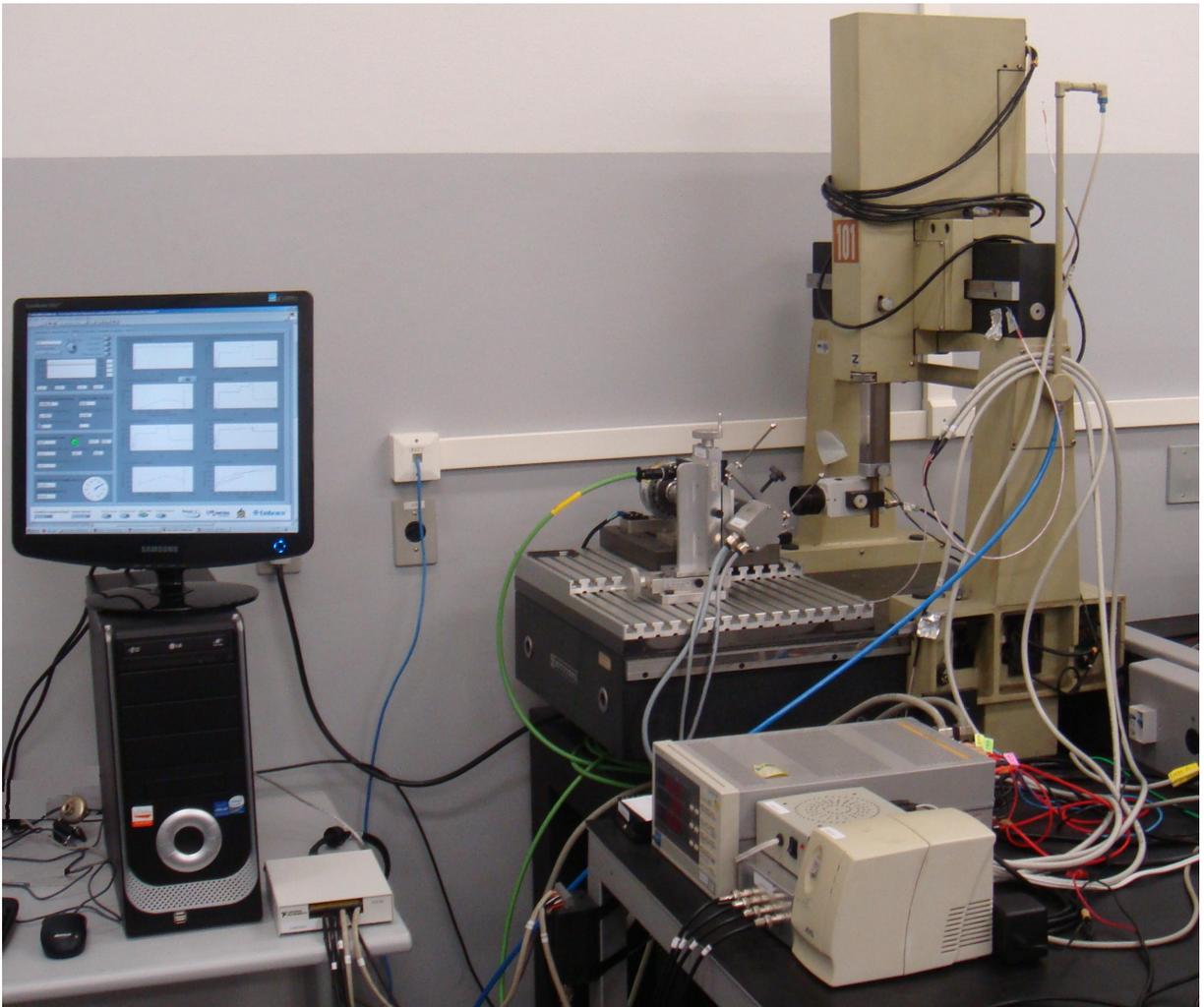


Figura 3.3: Foto da bancada

3.4 Detalhamento da bancada

Na presente seção estão apresentadas as características dos principais componentes da bancada de ensaios.

A partir dos requisitos estabelecidos no início do desenvolvimento da bancada, foi feita uma análise das soluções mais adequadas e seleção das alternativas disponíveis no mercado.

3.4.1 Aquisição de dados

Dentre as características de uma placa de aquisição, deve-se estar atento às seguintes: taxa de amostragem, número de canais, resolução, tipo de canais, faixas de medição e impedância de entrada (30). Para a seleção do sistema de aquisição da bancada foram analisados os seguintes parâmetros: número de canais, taxa de amostragem, frequência do contador e resolução.

Diversas grandezas devem ser conhecidas para a medição de potência mecânica. Nem todas estão relacionadas diretamente com a medição da potência mecânica, mas com as condições de trabalho às quais o sistema de medição estará submetido. No ensaio de medição de potência mecânica, é de interesse a magnitude das seguintes grandezas: torque, frequência rotacional, temperatura, corrente elétrica, tensão elétrica e potência elétrica.

3.4.1.1 Número de canais

A partir das grandezas listadas no parágrafo anterior, é possível determinar o número de canais necessários. Sabendo-se que a medição das grandezas elétricas será feita por um wattímetro, utilizando uma interface GPIB, portanto, independente da placa de aquisição, constatou-se a necessidade de uma placa de aquisição com, no mínimo, cinco canais analógicos e um contador digital.

3.4.1.2 Taxa de amostragem

Na aquisição de sinais, quanto maior a frequência de aquisição, mais fiel será a representação do sinal real. Sinais adquiridos com frequência baixa podem sofrer *aliasing* (31), que é a reconstrução de um sinal amostrado com frequência diferente do sinal original, introduzindo erros de medição.

Para escolha de uma placa com taxa de amostragem adequada, deve-se considerar a frequência de corte dos diferentes transdutores que compõem o sistema de medição. A medição de tor-

que, porém, é realizada em condição estática, ou seja, em um ponto específico de carregamento. E a dinâmica das demais grandezas (temperaturas) é lenta. Dessa forma, a taxa de amostragem não é fator determinante para a escolha da placa de aquisição mais adequada.

3.4.1.3 Resolução

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) (32), resolução é a menor diferença que pode ser percebida entre indicações. No contexto dos instrumentos digitais de medição, resolução pode ser expressa em termos de bits ou dígitos. Conversores analógico para digital (A/D) costumam expressar sua resolução em número de bits. Através da equação 3.1 (33), pode-se calcular o número de valores distintos em que o sinal de entrada pode ser expresso.

$$r = \frac{100}{2^n} \quad (3.1)$$

onde:

r = resolução;

n = número de bits.

Para determinar a resolução da placa basta resolver a equação 3.2 que, com o auxílio da especificação do número de bits de resolução fornecida pelo fabricante, permite determinar, em termos relativos, a resolução da placa (33).

De acordo com as condições de contorno impostas para o projeto, a incerteza de medição do torque em um ponto de carga não poderá ser superior a 0,5% da FM. Para verificar se a resolução da placa é suficiente para a aplicação, basta substituir na equação 3.1 o valor de n , que corresponde ao número de bits de resolução da placa.

$$r = \frac{100}{2^{12}} \quad (3.2)$$

$$\Rightarrow r = 0,0488\%$$

Através da resolução da equação 3.1, chegou-se à conclusão de que um sistema de aquisição com 12 bits satisfaz os requisitos do projeto. Essa afirmação, porém, é válida somente se a FM do conversor A/D for igual à do sinal de saída analógico do transdutor.

3.4.1.4 Frequência do contador

Para a medição da frequência rotacional é utilizado um *encoder* digital. Dentre os diversos métodos de medição, optou-se pela medição através de um contador digital. Essa baseia-se na contagem de pulsos, e sua principal fonte de incerteza é a frequência da base de tempo da placa. A contagem de pulsos é feita a partir da detecção das bordas do sinal do *encoder*. Portanto, quanto mais rápido for o *clock* do processador, mais exato será o sistema de medição. Na figura 3.4 pode-se observar que, quanto maior for a frequência de base, menor será o erro de detecção de borda.

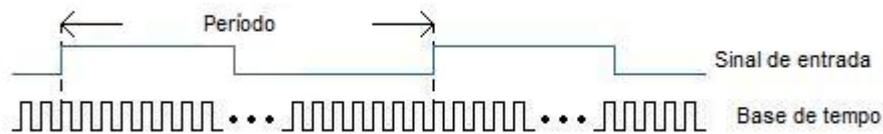


Figura 3.4: Detecção de pulsos

A função medição da frequência rotacional utilizando um contador pode ser expressa pela equação 3.3 e a resolução pela 3.4.

$$NP = \frac{NA \cdot FP}{FD} \quad (3.3)$$

onde,

NP : número de pulsos;

NA : número de amostras para um determinado período;

FP : frequência de base do contador;

FD : frequência rotacional detectada.

$$Res_{contador} = FD(NP) - FD(NP + 1) \quad (3.4)$$

O número de amostras é determinado a partir do período de medição especificado, conforme já demonstrado na seção 3.1.

A partir das duas equações apresentadas pode-se observar que quanto maior for a frequência de base, melhor será a resolução. Então, buscou-se uma placa com uma frequência de base elevada, garantindo, assim, uma baixa incerteza para a medição de frequência rotacional.

Na tabela 3.2 estão apresentados os requisitos necessários para a placa de aquisição, definidos a partir das questões até aqui discutidas, na seção 3.4.1.

Tabela 3.2: Requisitos para placa de aquisição

Grandeza	Número de canais	Tipo de sinal	Taxa de amostragem	Resolução
Torque	1	analógico	5 kHz	12 bits
Temperatura	3	analógico	1 kHz	12 bits
Frequência rotacional	1	digital	100 MHz	-

3.4.1.5 Seleção da placa de aquisição

A *National Instruments* é um grande e bem conceituado fabricante de placas de aquisição. Suas placas são reconhecidas tanto em empresas como em institutos de ensino e pesquisa, devido a sua robustez, confiabilidade e baixa incerteza. Daí a opção pela utilização de uma placa de aquisição desse fabricante.

Procurou-se por uma placa que satisfizesse todos os requisitos de projeto. Diversas placas de aquisição foram pesquisadas; quatro placas e um módulo *compact fieldpoint* foram estudados detalhadamente. Suas especificações são apresentadas detalhadamente no apêndice A.

Dentre as cinco soluções, optou-se pela placa de aquisição FPGA modelo 7831R, devido às seguintes vantagens:

- possibilidade de avaliar uma tecnologia emergente – FPGA;
- taxa de amostragem elevada, bem acima do necessário;
- frequência de base do contador na ordem dos 100 MHz;
- permitir gravar rotinas de aquisição e condicionamento de sinais em hardware;
- possibilitar a criação e reconfiguração de canais de entradas e saídas.

Suas principais características podem também ser consultadas no apêndice A.

3.4.2 Transdutor de torque

A partir dos requisitos estabelecidos no capítulo 1 para a medição de potência mecânica, estabelece-se os seguintes requisitos para o sistema de medição de torque:

- torque máximo de 500 mN.m;

- incerteza de medição máxima de 1% para toda a FM;
- sistema facilmente automatizável.

Diversos tipos de transdutores de torque, com diferentes princípios de funcionamento foram pesquisados. A partir de uma análise comparativa entre os transdutores disponíveis no mercado, optou-se pela aquisição do transdutor modelo TMHS303 da Magtrol (7) para a medição de torque. A tabela comparativa utilizada para análise pode ser consultada no apêndice B. Esse transdutor também possibilitou a medição de frequência rotacional, através de um *encoder* embarcado no sistema de medição.

3.4.2.1 Princípio de funcionamento

A medição de torque é baseada no princípio da variação, ou seja, torque proporcional ao acoplamento do transformador. O transdutor é composto, basicamente, por três elementos: a região de deformação do eixo, um par de bobinas e dois cilindros metálicos. A figura 3.5 mostra a estrutura básica desse transdutor.

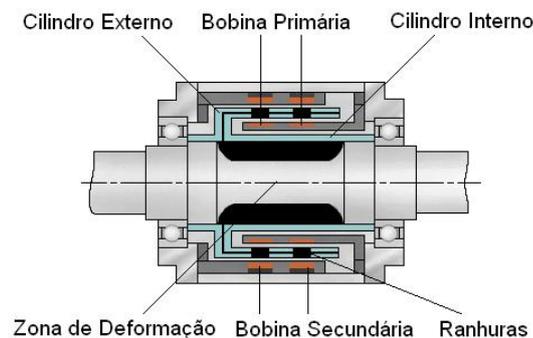


Figura 3.5: Estrutura interna do transdutor de torque TMHS303 (7)

As bobinas primária e secundária que compõem o transformador diferencial estão separadas por dois cilindros concêntricos de alumínio. Esses cilindros estão conectados ao eixo de medição de torque. O cilindro externo está ligado a um lado da zona de deformação, e o cilindro interno ao lado oposto. Quando nenhum torque é aplicado ao eixo de medição, as ranhuras não se sobrepõem. Nessa situação, devido aos cilindros serem de material não magnético, ocorre filtragem total e, conseqüentemente, não é gerada indução diferencial entre as bobinas.

Quando um torque é aplicado ao eixo, a zona de deformação é submetida a um aumento de deslocamento angular. A sobreposição entre as ranhuras é aumentada, criando uma abertura para o fluxo magnético. A quantidade de indução diferencial é proporcional ao torque aplicado.

Desta forma, quando a bobina primária for alimentada por um sinal de tensão senoidal, a bobina secundária produzirá uma tensão, na qual a amplitude é dependente do torque aplicado.

3.4.2.2 Transformador diferencial

A bobina primária consiste de dois enrolamentos iguais montados em série. Ela é excitada por uma corrente alternada com frequência de 20 kHz, que é gerada por uma eletrônica embarcada no transdutor. Adicionalmente, uma corrente constante é fornecida à bobina primária a fim de determinar a temperatura da unidade de medição, para compensar o efeito da temperatura.

A bobina secundária é composta por dois enrolamentos com oposição de fase. Ela quantifica o espaçamento entre as ranhuras do cilindro, produzindo um sinal de tensão proporcional ao torque dinâmico (7).

As características do transdutor, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Especificação do transdutor de torque Magtrol modelo TMHS303

Transdutor de torque TMHS303	
Saída	± 5 ou ± 10 V
Faixa de Medição	0.5 N.m
Não linearidade	especificado no E_c
Histerese	especificado no E_c
Repetitividade	-
Erro Combinado	0,1% da faixa de medição
Largura de Banda	1 a 5000 Hz
Deriva do Zero	< 0,01% da FM/1000 rpm
Influência da temperatura no zero/sensibilidade	< 0,1% da FM/10 K
Estabilidade	< 0,05% da FM/ano
Diâmetro do eixo	6 mm
Medição de Rotação	1 canal - 60 pulsos/rev

A partir dos dados contidos na tabela 3.3 pode-se afirmar que o transdutor de torque cumpre satisfatoriamente todos os requisitos de projeto.

3.4.3 Acoplamentos mecânicos

Devido à elevada frequência rotacional em que o sistema opera, a escolha de um acoplamento adequado torna-se uma questão crítica. Para funcionamento seguro e adequado do sistema, são desejáveis as seguintes características:

- elevada rigidez à torção:

- torque nominal suportado três vezes maior do que o admissível pelo transdutor de torque;
- frequência rotacional superior a 15000 rpm;
- admitir desalinhamentos, tanto angular, como paralelo e axial, evitando vibrações, que podem ocasionar falhas na medição de torque ou até mesmo danos ao sistema.

O acoplamento foi escolhido através de uma análise comparativa entre os diferentes modelos, marcas e tipos de acoplamento encontrados no mercado. Dentre as diversas possibilidades estudadas, decidiu-se pela aquisição de um acoplamento de discos duplos, modelo BSD 965-37-000, da empresa Magtrol (34), por cumprir todos os requisitos estabelecidos. Na tabela 3.4 são apresentadas as principais características desse acoplamento e, na figura 4.1, é mostrada uma foto do mesmo.

Tabela 3.4: Especificação do acoplamento

Acoplamento Double-flex BSD 965-37-000	
Torque máximo	1.56 N.m
Frequência rotacional máxima	44000 rpm
Furo	4 a 14 mm
Comprimento	48 mm
Momento de inércia	$14,01 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Rigidez torcional	2598,6 N.m/rad
Desalinhamentos	+/- 0,8 mm (radial) 0,7 mm (paralelo) 1,5° (angular)

3.4.4 Freio

Para aplicar carga mecânica ao motor foi necessária a especificação de um freio com controle elétrico da potência, para o qual são desejáveis as seguintes características:

- longo tempo de vida;
- larga faixa de frequência rotacional;
- boa controlabilidade;
- alta repetitividade de torque.

Após análise de alguns tipos de freio, contato com fabricantes dos mesmos, e recomendações obtidas em contato com o fabricante do transdutor de torque previamente selecionado,

concluiu-se que um freio magnético de histerese seria a opção mais adequada para servir como carga mecânica imposta ao motor sob ensaio.

O efeito da histerese é aplicado para o controle de torque pelo uso de dois componentes básicos; uma estrutura de polo reticulado e um conjunto rotor/eixo fixados juntos, mas sem contato físico. Se a bobina estiver desenergizada, o rotor pode girar livremente sobre os rolamentos de esferas. Já se uma força magnética de uma bobina ou um magneto for aplicada à estrutura do polo, o entreferro se transforma em um campo de fluxo. Assim, o rotor é contido magneticamente, freando a estrutura do polo e o rotor (27). O controle do campo é realizada pela corrente.

O freio de histerese selecionado é do fabricante Magtrol. Ele fornece um torque suave, facilmente controlável e independente da frequência rotacional (27).

As principais características do freio selecionado estão listadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Características do freio histerese Magtrol modelo AHB-1

Freio de Histerese AHB-1 Magtrol	
Torque mínimo na corrente nominal	1 N.m
Rotação máxima	25000 rpm
Inércia externa	0,876 kg.cm ²
Alimentação	24 V
Corrente nominal	400 mA
Potência	9,6 W
Temperatura de operação	-40 °C a +85 °C

A figura 3.6 ilustra a estrutura interna do freio de histerese AHB-1.

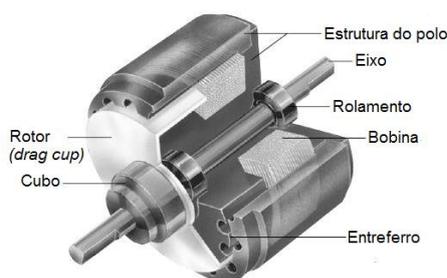


Figura 3.6: Freio de histerese Magtrol AHB-1

3.4.5 Fonte de corrente contínua para controle do freio

O controle da carga mecânica é realizado através da aplicação de uma corrente na bobina. Então, tornou-se necessária a especificação de uma fonte de corrente contínua para suprir essa necessidade.

Para o controle adequado do freio é desejável que a fonte utilizada para seu acionamento possua as seguintes características:

- baixo *ripple* e ruído;
- pequena faixa nominal de corrente;
- baixa resolução;
- controle de tensão e corrente por uma tensão analógica externa (0 a 10V);
- controle via interface GPIB.

Três fontes foram pré-selecionadas para uma análise mais detalhada. Os modelos e características dessas fontes estão apresentados detalhadamente na tabela C.1 no apêndice C.

A partir das informações contidas nos dados de catálogo dos fabricantes, a fonte Lambda Genesys se destacou perante as outras fontes, devido, principalmente, à sua melhor resolução e por possuir uma faixa nominal de corrente mais adequada à aplicação. As fontes de alimentação Lambda Genesys (35) oferecem uma elevada performance, com alta confiabilidade e estabilidade. A linha de produtos inclui diversos modelos com diferentes níveis de tensão, podendo ainda ser customizados conforme a necessidade. Permitem também ser interconectadas em série ou em paralelo.

3.4.6 Corpos de ensaio

A principal condição estabelecida para o desenvolvimento da bancada foi a medição de potência mecânica de motores elétricos em alta rotação. Para satisfazer essa condição, o motor escolhido deve ter as seguintes características:

- frequência rotacional nominal elevada – até 15000 rpm;
- longo tempo de vida;
- alta dissipação de calor;
- características lineares de controle do motor – boa controlabilidade.

A partir dos requisitos traçados, foram selecionados dois modelos de motores do tipo *brushless DC* (motores de CC sem escovas) para realização da avaliação operacional da bancada desenvolvida. Esse tipo de motor dispensa a comutação mecânica, que está presente em motores

de corrente contínua tradicionais, permitindo, assim, atingir a frequência rotacional estabelecida como requisito.

Comutados eletronicamente, os motores EC da Maxon são motores de CC de alta qualidade, com magnetos de *neodymium*, que proporcionam a comutação senoidal (36).

Ambos os modelos selecionados são do mesmo fabricante, a Maxon, diferenciados apenas pela sua potência nominal. Um dos motores possui potência de 150 W e o outro de 400 W. Tais valores foram escolhidos com objetivo de cobrir toda a faixa de medição de interesse.

Em conjunto com cada motor, adquiriu-se um *encoder* óptico do mesmo fabricante dos motores, vindo de fábrica já acoplado ao motor. A aquisição do *encoder* foi necessária pelo fato do servo-amplificador precisar de um *encoder* de três canais para fazer a comutação senoidal; e também para servir como referência para a validação do sistema de medição de frequência rotacional do transdutor de torque.

A tabela 3.6 apresenta um resumo das características dos motores.

Tabela 3.6: Principais características dos motores Maxon

	Motor EC45	Motor EC60
Potência elétrica [W]	150	400
Frequência rotacional máxima [rpm]	15000	7000
Constante de torque [mN.m/A]	21,4	147
Temperatura máxima [°C]	+100	+100

3.4.7 Unidade de controle dos motores

Motores do tipo *brushless DC* necessitam de um circuito eletrônico de comutação específico para seu acionamento. Existem três tipos de servo-acionamento, se diferenciando apenas pelo seu tipo de comutação. São eles: comutação *sensorless* (sem sensor), comutação de bloco e comutação senoidal.

3.4.7.1 Comutação *sensorless* (sem sensor)

A posição do rotor é determinada através do comportamento da tensão induzida. A passagem por zero da tensão induzida é verificada eletronicamente. A corrente do motor é comutada após uma pausa, dependente da frequência rotacional (36).

A amplitude da tensão induzida depende da frequência rotacional. Quando parado ou em baixa rotação, o sinal de tensão é baixo, o que dificulta a detecção da passagem por zero precisamente. Por isso, algoritmos especiais são necessários para a partida.

Este tipo de comutação possui diversas desvantagens se comparado aos outros métodos, podendo-se destacar as seguintes (36):

- *ripple* no torque de 14%;
- partida não definida;
- dificuldade no chaveamento em baixa rotação;
- não utilizável em aplicações dinâmicas.

Frequentemente, esse método é utilizado em aplicações com regime de operação contínuo como, por exemplo, ventiladores de alta rotação e compressores de refrigeração.

3.4.7.2 Comutação de bloco

A posição do rotor é dada por três sensores Hall. Os sensores estão dispostos a 120° um do outro, permitindo fornecer seis combinações de chaveamento distintos por revolução. Os três enrolamentos parciais do motor são alimentados em seis fases diferentes de condução, de acordo com a informação do sensor. As curvas de corrente e tensão são em forma de bloco. A posição do chaveamento de cada comutação eletrônica é compensada por 30° do respectivo torque máximo (36).

Características da comutação de bloco (36):

- *ripple* no torque de 14%;
- eletrônica relativamente simples;
- partida do motor controlada;
- permite torques e acelerações de partida elevados se comparado com outras formas de comutação.

Aplicado geralmente em operações de posicionamento e como *driver* de servo motores altamente dinâmicos.

3.4.7.3 Comutação senoidal

Sinais de alta resolução oriundos do *encoder* são utilizados para geração de um sinal de corrente senoidal. As correntes entre os três enrolamentos do motor, afastada em cada fase por 120 graus, são dependentes da posição do rotor. Resulta um funcionamento preciso (operações de posicionamento) e suave (sem *ripple*) do motor, possibilitando assim uma alta qualidade de controle.

Suas principais vantagens, comparado aos métodos anteriores, são as seguintes (36):

- sem *ripple* no torque;
- torque mais contínuo, aproximadamente 5% abaixo da comutação de bloco;
- movimentos suaves, mesmo em baixas frequências rotacionais;
- compatibilidade entre o motor e o acionamento.

Devido às vantagens mencionadas, foi escolhido um servo acionamento com comutação senoidal para a bancada. A Maxon, fabricante de motores, servo acionamentos e equipamentos do gênero, disponibiliza uma vasta gama de tipos de acionamento de motores. Dentre os equipamentos fabricados pela Maxon está o servo amplificador DES/7010 (37), que apresenta comutação senoidal. Mais detalhes sobre o servo amplificador DES/7010 estão descritos na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Características do servo-amplificador DES/7010

Servo amplificador DES/7010	
Tensão de operação	24 a 70 V
Máx. corrente de saída I_{max}	30 A
Frequência de chaveamento	50 kHz
Rendimento máximo	92%
Banda do controlador de corrente	1 kHz
Frequência rotacional máxima	25000 rpm
Temperatura de operação	-40 a +85°C

3.4.8 Sistema de fixação

Para montagem da bancada, foi necessário fazer um estudo sobre um sistema de fixação do conjunto, motor, transdutor e freio. São desejáveis as seguintes características para esse sistema:

- possuir um mecanismo simples para fixação do motor, além de possibilitar a fixação de motores com diferentes diâmetros;
- permitir ajuste do posicionamento do motor, através de um *knob*, que facilite o alinhamento com o sistema de medição;
- possuir uma base que permita a fixação do restante do sistema de medição, contribuindo com o alinhamento, diminuindo, assim, possíveis vibrações.

Tanto o transdutor como o freio são equipamentos produzidos pela Magtrol, o que motivou a procurar uma solução do mesmo fabricante. Após uma análise detalhada dos dispositivos oferecidos pelo respectivo fabricante, optou-se pelo sistema de fixação modelo AMF-1 (38), que cumpre satisfatoriamente os requisitos estabelecidos.

A tabela 3.8 traz mais informações sobre esse sistema de fixação.

Tabela 3.8: Características do sistema de fixação AMF-1

Sistema ajustável de fixação AMF-1	
Diâmetro do motor	até 101,6 mm (4 in)
Ponte de fixação	1
Base	<i>T-slot base plate</i>
Comprimento da base	500 mm
Largura da base	350 mm

Na figura 3.7 é mostrado um modelo 3D do sistema de fixação.

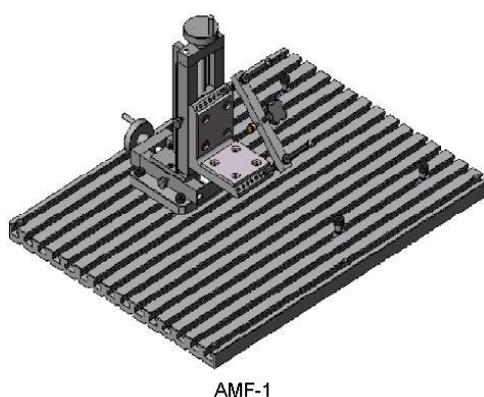


Figura 3.7: Sistema de fixação Magtrol AMF-1

Com o objetivo de minimizar ainda mais possíveis vibrações foi acoplada, adicionalmente à base de fixação, uma mesa de granito já disponível no laboratório no qual o desenvolvimento da bancada foi realizado.

3.4.9 Sistema de medição de temperatura

Para o medição da temperatura do sistema foram utilizados sensores Pt100. A topologia de condicionamento dos sinais proposta por Anderson Loop foi adotada para o circuito de medição.

A topologia de circuito de laço de corrente constante, também conhecido como Anderson Loop (nome atribuído em homenagem ao engenheiro que desenvolveu o circuito, Karl F. Anderson), foi desenvolvida para superar as dificuldades inerentes da ponte de Wheatstone. É um conceito de condicionamento para sinais de transdutores resistivos, podendo ser implementado em diversas configurações, dependendo da aplicação (39).

A estrutura básica proposta por Karl, foi de uma fonte de corrente constante em série com o(s) transdutor(es) e um resistor de referência, e por dispositivos eletrônicos capazes de medir e processar as tensões sobre os elementos resistivos. A estrutura básica deste circuito esta apresentada na figura 3.8.

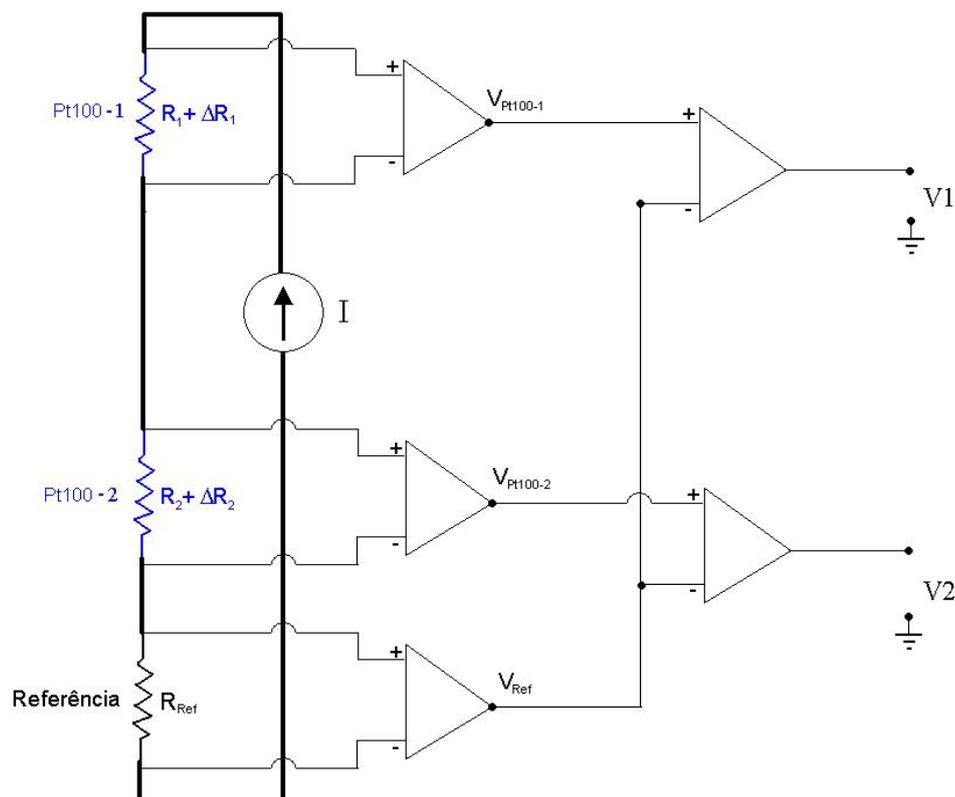


Figura 3.8: Circuito Anderson Loop

Diversas vantagens na utilização deste circuito podem ser citadas, dentre as principais destacam-se (39, 26):

- imunidade à resistência dos fios;

- medição diferencial;
- linearidade da variação de resistência;
- dobro da sensibilidade do circuito de Ponte de Wheatstone;
- utilização de múltiplos transdutores;
- compensação de temperatura.

4 Sistema de medição e monitoramento do alinhamento

Em ensaios de medição dinâmica de motores elétricos com carga é essencial o conhecimento do nível de alinhamento entre os eixos, para que seja garantido um funcionamento adequado do sistema. Sabe-se que, mesmo utilizando a montagem *in-line*, na qual o transdutor de torque é acoplado junto ao eixo do motor e da carga, o alinhamento ainda é um assunto crítico. A presença de desalinhamentos pode causar erros significativos na medição de torque. Esforços decorrentes podem se tornar destrutivos em altas frequências rotacionais, especialmente para o acoplamento e para o transdutor de torque. Nesse contexto, foi desenvolvido, no âmbito desta dissertação, um sistema de medição e monitoramento do alinhamento (SMMA).

4.1 Princípio de medição

Diversos métodos para medição dinâmica dos desalinhamentos são recomendados pela literatura (40) e pelos próprios fabricantes de motores. Os principais métodos recomendados são os seguintes:

- medição com sensor por triangulação a laser;
- medição por sensor de corrente Eddy;
- sistema de visão.

Os sistemas de medição que operam pelos primeiros métodos têm preços elevados e necessitam da utilização de mais pontos de medição, o que torna o sistema caro. Devido a esse problema, optou-se pelo desenvolvimento de um método de medição indireta do alinhamento, através de um sistema de visão.

A proposta deste trabalho é que a medição seja realizada de forma indireta, ou seja, não será medido diretamente o alinhamento dos eixos e sim a inclinação das flanges do acoplamento.

Foram utilizados acoplamentos do tipo *double-flex*, da Magtrol, apresentado na figura 4.1 (34). Tais acoplamentos se destacam por suportarem, dentro de limites estabelecidos pelo fabricante, todas as formas de desalinhamento: paralelo, angular, folga (41).



Figura 4.1: Acoplamento Magtrol

Na figura 4.2 são apresentadas as três formas de desalinhamento.

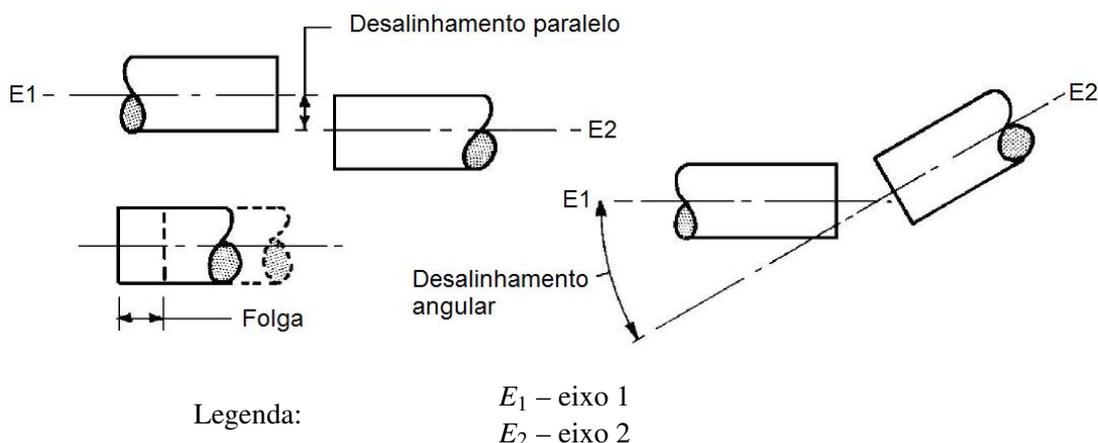


Figura 4.2: Formas de desalinhamento

Quando um acoplamento do tipo *double-flex* é submetido a um desalinhamento entre os eixos, ele tende a se deformar, compensando o efeito do desalinhamento. Na ausência de desalinhamento, as flanges do acoplamento permanecem paralelas ou, caso ocorra um desalinhamento, suas paredes tendem a se inclinar, conforme mostrado pela figura 4.3.

Pode-se observar, na figura 4.3, a inclinação das flanges do acoplamento devido ao desalinhamento vertical dos eixos. A partir da identificação desse comportamento foi possível elaborar um método para a medição indireta do alinhamento dos eixos.

A medição indireta é realizada através da medição do “não paralelismo” das flanges do acoplamento. São definidas doze zonas de medição, conforme mostrado na figura 4.3 pelos retângulos vermelho, onde são detectados os vértices das flanges. Após a detecção dos vértices é, então, medida a distância entre cada um dos seis pares de vértices. Considerando-se o acoplamento dividido em três partes, parte inferior, central e superior, calcula-se a diferença entre

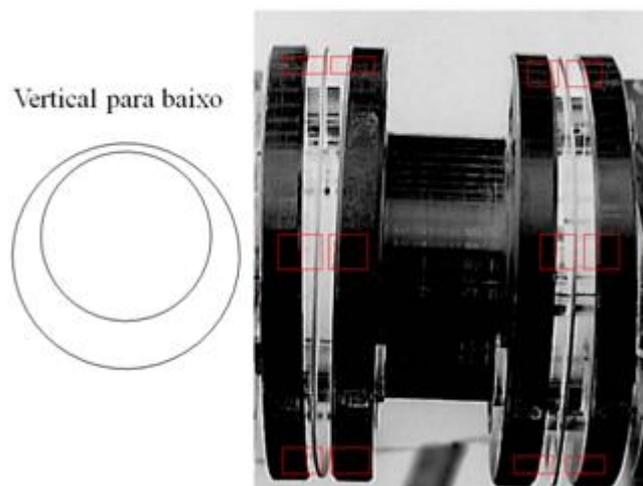


Figura 4.3: Efeito do desalinhamento vertical no acoplamento

o lado esquerdo e o direito e, caso haja uma diferença significativa entre eles, pode-se afirmar que os eixos estão desalinhados.

Todos os acoplamentos utilizados na bancada de motores são do tipo *double-flex* e com as mesmas dimensões, exceto o diâmetro dos eixos. Isso facilitou na especificação do valor de tolerância do alinhamento. Conforme especificação fornecida pelo fabricante, o acoplamento admite um desalinhamento paralelo de, no máximo, $700 \mu m$. Então, estipulou-se um valor para a tolerância no máximo um terço do limite de desalinhamento do acoplamento, podendo-se, assim, garantir que o sistema está operando em condições satisfatórias.

4.2 Instrumentação utilizada

O sistema de medição desenvolvido é composto por:

- placa de aquisição National modelo PCI NI-1411 (42);
- câmera de vídeo jAi série CV-S3300, com frequência de aquisição de 30 frames/s e resolução de 768x494 pixels (43);
- microcomputador;
- software de medição.

Foi desenvolvido em LabVIEW um software para medição e monitoramento do alinhamento dinâmico e também para o alinhamento do sistema, quando parado. Rotinas de detecção de vértices foram desenvolvidas utilizando o módulo *vision* do LabVIEW (44). A figura 4.4

mostra a tela do software de medição. Nela pode-se observar as curvas de desalinhamento, a foto do acoplamento com a zonas de medição destacadas pelos retângulos vermelhos. Configurações dos equipamentos, entrada para controle da frequência rotacional, parâmetros de ajuste para registro dos dados, botão de seleção de função (monitoramento ou alinhamento) e indicador de sinalização de estado (alinhado/desalinhado) também podem ser observados.



Figura 4.4: Tela do software de medição e monitoramento do alinhamento.

4.3 Ensaios de validação

Para validação do método de medição foram realizados cinco ensaios distintos, sendo um com sistema alinhado e o restante com desalinhamentos paralelos (horizontais e verticais).

Em cada ensaio mediu-se, inicialmente, o alinhamento para o sistema parado. A frequência rotacional do motor foi, então, variada para os seguintes níveis: 500 rpm, 1000 rpm, 2000 rpm, 4000 rpm, 8000 rpm e 12000 rpm. Após a estabilização da frequência rotacional em cada patamar, foram feitas dez medições, sendo que cada medição é a média de 30 aquisições. Ao término da medição de cada nível é feita a gravação dos dados no disco rígido e, logo após, é regulado o próximo ponto de rotação.

Excelentes resultados puderam ser alcançados nos cinco ensaios realizados para a validação

do método. Para cada um dos ensaios foi imposto um pequeno desalinhamento (aproximadamente $300 \mu m$, que pouco influenciou no funcionamento normal do sistema. Mesmo com um nível de desalinhamento muito pequeno, o sistema foi capaz de identificar muito bem o problema.

Observou-se um desvio nas medições do sistema estático em relação ao dinâmico. Constatou-se, no entanto, que esse efeito se deve ao fato de que, quando o sistema está parado, sofre influência de interferências na imagem, devido aos parafusos presentes no interior do acoplamento e do próprio chanfro do vértice do acoplamento. No entanto, quando o sistema está em modo de funcionamento dinâmico, ele é pouco suscetível a essa interferência, pois os dados adquiridos são médios, devido à alta frequência rotacional e à baixa frequência de aquisição da câmera.

Com a confirmação da eficácia do sistema de medição, foi feita avaliação metrológica do SMMA, que será apresentado na seção a seguir.

4.4 Avaliação metrológica

Para avaliação metrológica desse sistema, foi necessário levantar uma curva de correlação entre o afastamento das paredes da flange do acoplamento com o desalinhamento efetivo dos eixos, conforme o princípio de medição proposto na seção 4.1.

A Bancada de Ensaio de Motores Elétricos (BEME) está fixada em cima de uma mesa de medição por coordenadas que não dispõe de sistema eletrônico operacional. Porém, toda a estrutura mecânica da mesa está funcional, o que possibilitou a utilização do sistema mecânico na avaliação da correlação.

Para a correlação dos resultados foi utilizado, adicionalmente, um transdutor opto-eletrônico de deslocamento Mitutoyo, modelo MT 30. Esse transdutor foi adaptado a um dos braços da mesa para a medição do alinhamento dos eixos. Um certificado de calibração desse instrumento foi disponibilizado pelo Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação Certi. Uma cópia deste documento encontra-se no anexo A. A figura 4.5 mostra uma foto da bancada instrumentada para a calibração.

Detectou-se um não paralelismo entre a bancada e a mesa de coordenadas, tornando-se necessário o levantamento do posicionamento do eixo no espaço.

Com o transdutor de deslocamento MT30 adaptado à mesa, realizou-se medições para os eixos Y e Z. Diferentes níveis de desalinhamento foram impostos ao sistema, em três ensaios

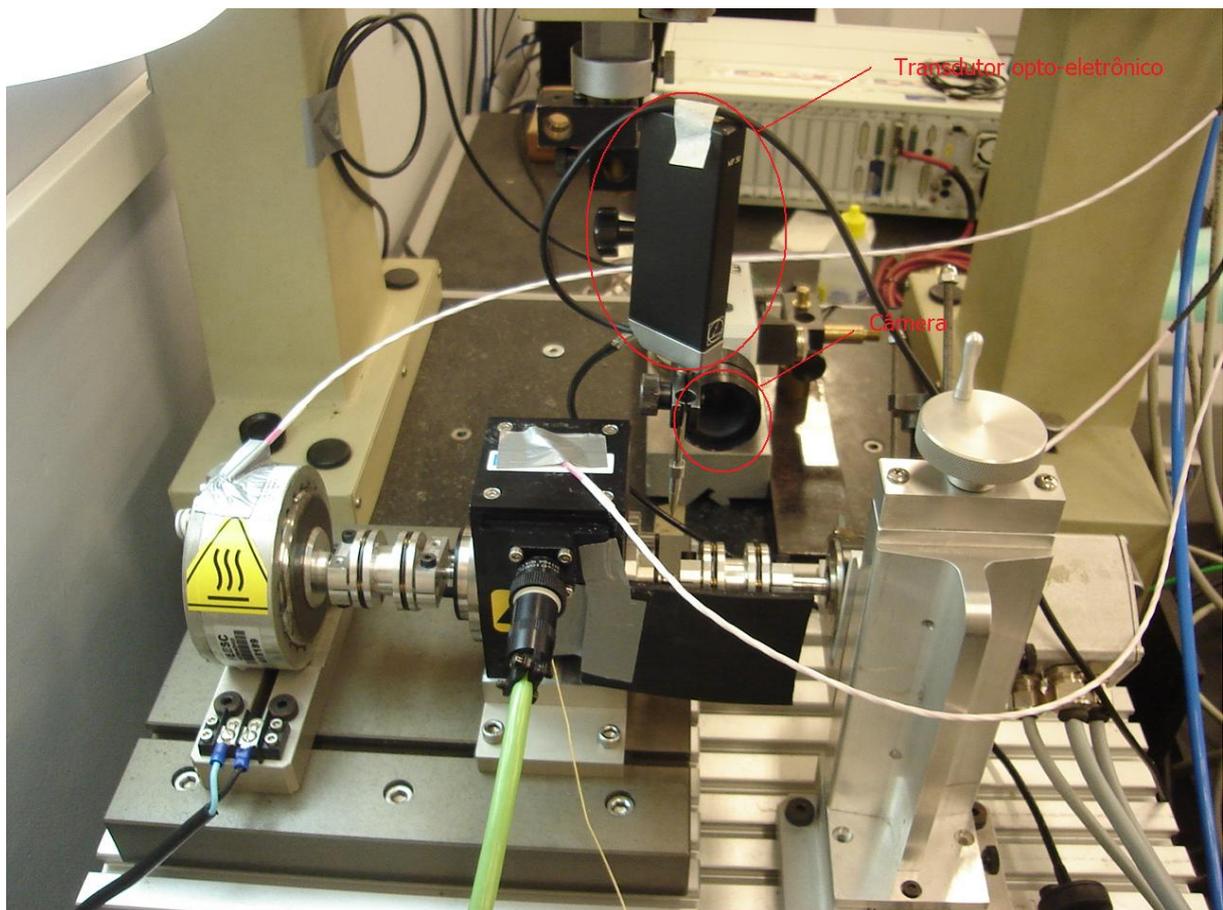


Figura 4.5: Bancada de ensaios instrumentada para correlação

distintos, com os mesmos pontos de medição. Ou seja, o sistema foi submetido aos mesmos níveis de desalinhamento, com objetivo de ter uma estimativa da repetitividade do mesmo. Foi especificada uma faixa de medição de 0 a 800 μm , devido a restrições físicas do acoplamento. Então, a partir dos dados medidos, traçou-se uma curva XY, correlacionando as medições obtidas pelos dois sistemas de medição. Levantou-se, então, a equação da reta para o sistema de visão.

Após a realização do procedimento descrito no parágrafo anterior, levantou-se as principais fontes de incerteza, que são:

- repetitividade do SMP: repetitividade do sistema de medição padrão;
- incerteza do transdutor de deslocamento: incerteza do transdutor de deslocamento utilizado;
- repetitividade do SM: repetitividade do sistema de medição avaliado;
- resolução do SMP: devida à resolução do sistema de medição padrão – 5 dígitos;
- resolução do SM: devida à resolução do sistema de medição avaliado – determinado a partir da dimensão de um pixel;
- incerteza no posicionamento X: devida ao erro de posicionamento do transdutor de deslocamento padrão no eixo X, resultando também em um erro na medição nos eixos Y e Z, devido ao desalinhamento espacial entre a estrutura mecânica da mesa de coordenadas e a bancada de ensaios;
- erro de linearidade: erro máximo.

As tabelas com o balanço das incertezas do SMMA podem ser visualizadas no apêndice E.

Como a estratégia de medição se altera para a medição de cada plano, não foi possível obter o mesmo valor de incerteza. Mesmo assim, foi possível obter valores de incerteza pequenos. A incerteza estimada para a medição no eixo Y foi de 64 μm ; já para o eixo Z foi de 168 μm . Pode-se observar que a incerteza na medição no eixo Z foi significativamente maior – cerca de três vezes. Contudo, os valores alcançados são perfeitamente adequados à aplicação. Destaca-se, como apresentado na seção 3.4.3, que o máximo desalinhamento suportado pelo acoplamento é de 700 μm em frequência rotacional de até 44000 rpm.

As figuras 4.6 e 4.7 apresentam, respectivamente, as curvas de correlação e de erro para a medição de desalinhamento no eixo Y.

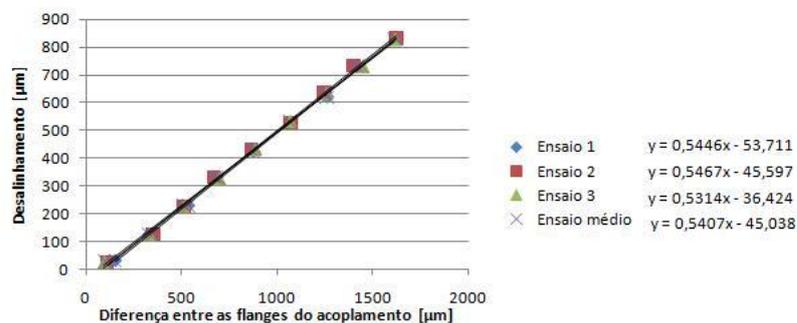


Figura 4.6: Curva de correlação

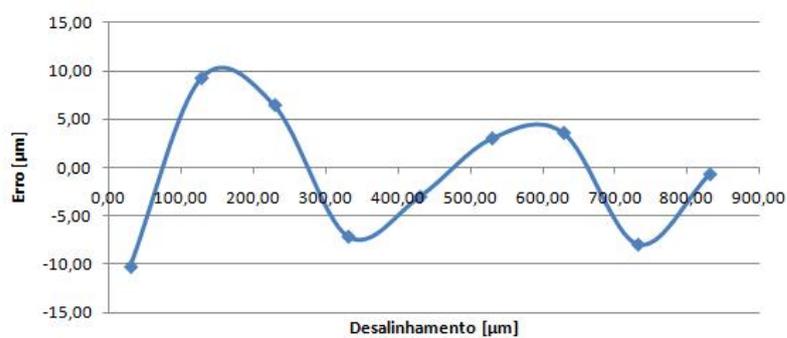


Figura 4.7: Curva de erro do sistema de visão

As curvas obtidas para a medição no eixo Z foram muito semelhantes, apresentando também excelente linearidade, porém, com um maior nível de dispersão.

5 Automação da bancada de ensaios

No presente capítulo são abordados os aspectos referentes à automação da bancada. Inicialmente são apresentados os tipos de aquisição e interfaceamentos utilizados. Em seguida, é feita uma descrição detalhada do software de medição desenvolvido. Por fim, é dada uma breve explicação sobre o controlador projetado.

5.1 Aquisição automatizada de dados

5.1.1 Placas de aquisição com tecnologia FPGA

FPGA são dispositivos semicondutores com portas lógicas desconectadas. Suas funcionalidades podem ser ajustadas através de uma configuração, via software, de suas portas lógicas (45).

Tipicamente, os FPGA são programados com auxílio de alguma ferramenta de desenvolvimento como, por exemplo, o VHDL (46). A linha *Intelligent* DAQ da National Instruments permite a um usuário com conhecimentos em LabVIEW embarcar códigos de programação em um *chip* FPGA, sem nenhum conhecimento prévio em ferramentas de programação de hardware. Tarefas de aquisição de dados completamente flexíveis e customizadas podem ser implementadas, obtendo-se maior confiabilidade e temporização real em hardware (45).

A utilização do LabVIEW permite, de maneira intuitiva, a representação de temporização, concorrência e paralelismo do hardware do FPGA. Adicionalmente, permite integrar facilmente um hardware FPGA com outros sistemas de medição e controle.

Conforme já mencionado no capítulo 3, foi utilizada para a aquisição e pré-processamento dos sinais de torque, temperatura e frequência rotacional, uma placa de aquisição com tecnologia FPGA.

5.1.2 Interfaceamento RS-232

O padrão RS-232 foi desenvolvido pela EIA para a comunicação serial entre dois dispositivos. Os cabos devem ter no máximo 15 m de comprimento e velocidade máxima de transmissão de 1 Mb/s (mega bits por segundo) (47). A desvantagem deste padrão é a existência de vários tipos de cabo, conectores e parâmetros de configuração (como *baud rate*, bits de dados, bits de parada, controle de fluxo e paridade), que exigem muito conhecimento e muito tempo despendido para sua implementação (48). É uma interface obsoleta, que está perdendo espaço para novas tecnologias, mas que ainda é encontrada em grande parte dos equipamentos de instrumentação.

O servo-acionamento especificado para o motor permite dois tipos de comunicação entre o inversor e o computador. O inversor possui interfaces RS-232 e CAN. Analisou-se os dois tipos de interfaceamento e optou-se pela utilização da interface RS-232. A comunicação CAN foi descartada por não haver uma interface de comunicação disponível no computador utilizado.

O fabricante do inversor fornece um manual com o protocolo de comunicação do inversor, o que facilitou consideravelmente a medição e configuração dos diversos parâmetros. Foram desenvolvidas rotinas em LabVIEW para ajuste dos parâmetros dos motores, parâmetros de operação do inversor e ajuste do *setpoint* do controlador de frequência rotacional.

5.1.3 Interfaceamento GPIB

O padrão GPIB foi introduzido em 1960 pela Hewlett Packard sob o nome HPIB (*Hewlett Packard Interface Bus*). Em 1975, foi padronizado pela IEEE, passando a ser chamado IEEE-488.1 ou GPIB (*General Purpose Interface Bus*), com velocidade de transmissão de 1 Mb/s (mega bits por segundo). Mais tarde a velocidade de transmissão foi aumentada para 1,5 Mb/s (mega bits por segundo), sendo denominado IEEE-488.2 (49). Esse padrão utiliza transmissão paralela de 8 bits, sendo possível conectar até 15 instrumentos. Consiste em um avanço significativo em relação ao padrão RS-232, pois possui maior velocidade, confiabilidade, determinismo e menos opções de cabos e conectores. Porém, a necessidade de uma placa dedicada, alto custo, baixa velocidade de transmissão (mesmo sendo superior à da RS-232), cabos pesados e de curto comprimento são algumas desvantagens dessa interface (48).

A transmissão dos dados de medição de potência elétrica foi realizada através deste tipo de interface, disponível no wattímetro Yokogawa modelo WT230. Além da interface GPIB, o wattímetro possui uma interface analógica de medição.

Os parâmetros da fonte Lambda, utilizada para controle do freio, e o *setpoint* de corrente são também ajustados via interface GPIB.

Com auxílio dos manuais do usuário e dos *drivers* disponibilizados pelos fabricantes, foram desenvolvidas rotinas de configuração, medição automatizada e ajuste do *setpoint* do controlador de carga.

5.2 Desenvolvimento do software

Para aquisição, tratamento e armazenamento dos dados obtidos nos experimentos, foram desenvolvidos dois softwares de medição, um embarcado em hardware e outro no PC. Ambos são explicados detalhadamente nas seções a seguir.

5.2.1 Software embarcado

Um software de aquisição e pré-processamento dos dados foi implementado em LabVIEW, utilizando os recursos do módulo FPGA LabVIEW (50).

Para aquisição dos sinais contínuos foram criados cinco canais analógicos, sendo um para o sinal de torque e o restante para os sinais de temperatura. Todos os canais foram configurados para operar em paralelo, uma das grandes vantagens da tecnologia FPGA.

A medição do sinal de frequência rotacional foi feita utilizando-se um canal digital da placa de aquisição. Um tipo de estrutura especial foi utilizada para o laço de medição, chamada *timed loop* (51). Essa estrutura permite um laço temporizado, com excelente exatidão.

O sinal original de rotação, possui um elevado nível de ruído. Para minimizar esse problema, foram elaboradas duas soluções: a primeira, através da utilização de um filtro externo; na segunda, criou-se um filtro digital no FPGA. A segunda foi essencial para alcançar os excelentes resultados na medição de frequência rotacional.

Cada rotina de aquisição implementada no FPGA pode ser configurada através do software de controle, a partir do ajuste de variáveis que estão acessíveis em uma aba específica para configuração do sistema.

5.2.2 Software de controle

O software de controle foi integralmente desenvolvido em LabVIEW (29). No apêndice D é apresentado um fluxograma do programa de controle.

A tela principal do software é composta por uma estrutura de abas (seis). A primeira é responsável pelo ajuste dos parâmetros de medição, como regulagem dos instrumentos e configuração dos sinais de aquisição. A configuração das aquisições é feita no software de controle e os valores ajustados são enviados para o FPGA, que é responsável por realizar o restante do procedimento de aquisição.

O programa pode operar de dois modos: manual e automático. Caso se deseje que o teste seja realizado automaticamente, deve-se especificar os pontos de carga. Esses pontos podem ser ajustados na segunda aba. O software permite que o usuário forneça os dados de duas formas. Na primeira, os pontos de carga desejados podem ser previamente definidos em um arquivo de texto e depois ser importados pelo software, indicando apenas o local e nome do arquivo. A outra forma é através do preenchimento dos pontos de carga em uma tabela presente no corpo dessa aba.

Os dados instantâneos das diversas grandezas medidas podem ser visualizados através dos gráficos e indicadores presentes na terceira aba. Curvas de torque, frequência rotacional, potência mecânica, potência elétrica e rendimento são apresentadas. Pode-se citar alguns outros recursos interessantes do software nesta tela, tais como: ajuste do tipo de controlador (52), controles com opção de ciclo automático ou manual, limpeza dos gráficos, armazenamento de dados, geração de relatórios, alinhamento dos eixos, entre outros. Na figura 5.1 pode-se observar uma imagem dessa aba.

O programa permite também a geração automática de relatórios, tanto no ambiente do LabVIEW como no Excel. Na quarta aba são apresentados diversos indicadores com resultados do ensaio. São apresentados, em uma tabela, as diversas medidas nos diferentes pontos de carga e um gráfico com as curvas de rendimento. Esses dados possibilitam uma análise prévia do ensaio. Na figura 5.2 é exibida uma imagem desta aba.

A quinta aba, nomeada como “Resultados da medição”, mostra todos os resultados das medições metrologicamente avaliados. Rotinas para avaliação das incertezas e ajuste de casas decimais dos resultados de medição foram desenvolvidas. Até o presente momento, são avaliadas apenas as seguintes grandezas: torque, frequência rotacional e, indiretamente, potência mecânica. Gráficos com os resultados de medição também são apresentados.

O SMMA foi integrado ao software de controle, visando o monitoramento *on-line* do ali-



Figura 5.1: Tela das medições

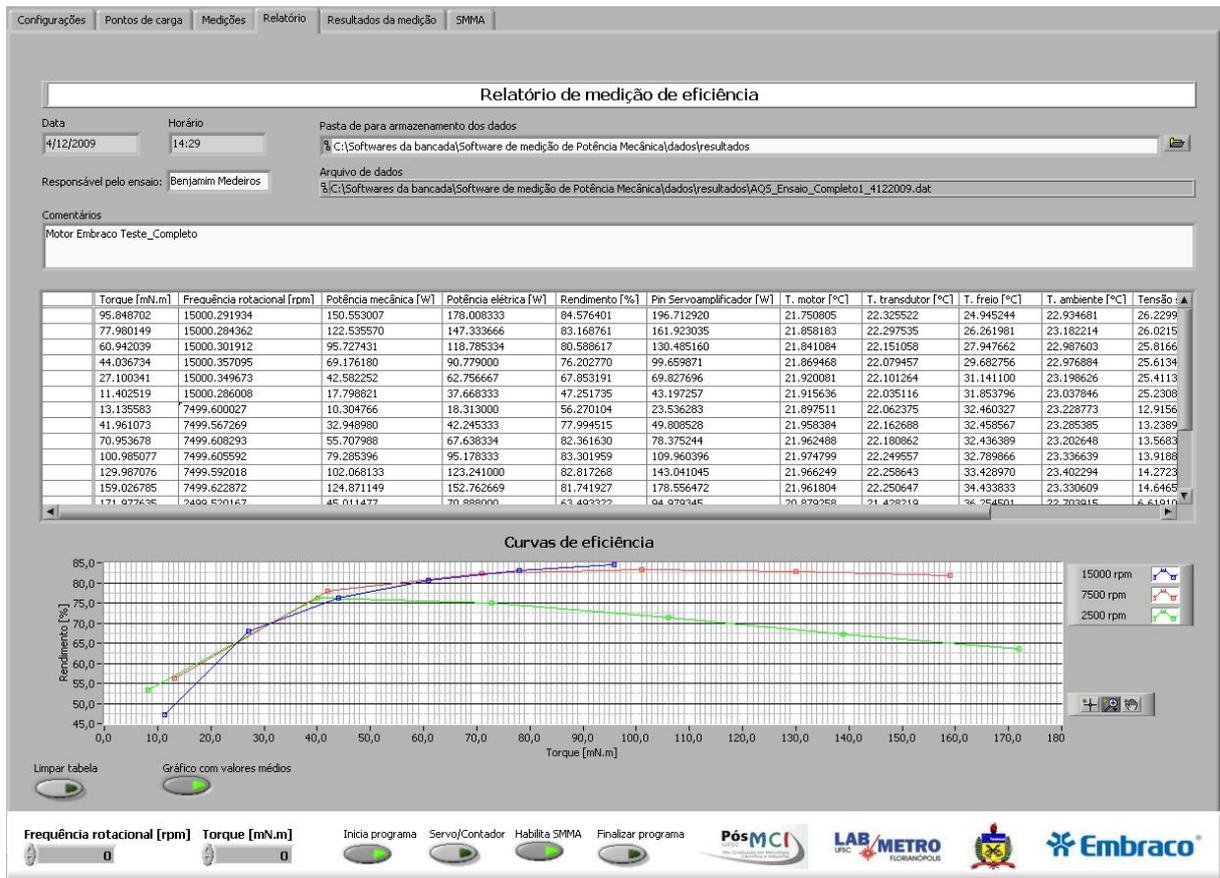


Figura 5.2: Tela dos relatórios de medição

nhamento do sistema, tendo sido inserido na última aba. Todos os dados referentes à medição do desalinhamento, como especificação de limite de tolerância, resultados das medições e imagem do acoplamento, podem ser lidos e ajustados nessa tela.

5.3 Controlador

Para o controle da carga à qual o motor é submetido foram desenvolvidos dois tipos de controladores, um do tipo proporcional-integral (PI) integralmente desenvolvido no âmbito desta dissertação, e outro do tipo Fuzzy (53).

O controlador Fuzzy foi implementado por um doutorando vinculado ao Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaio Aplicados à Refrigeração (LIAE)/Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC (Labmetro). Esse teve como objetivo comparar o desempenho frente ao PI. A estrutura do controlador Fuzzy não será apresentada neste documento, por não ter sido utilizado nos ensaios realizados até o momento. No entanto, há uma perspectiva de serem retomados estudos dessa estratégia de controle, devido a suas vantagens de projeto e pelos resultados bastante satisfatórios alcançados em ensaios preliminares realizados. Os dois controladores apresentaram desempenho muito semelhante. Porém, optou-se pelo controlador PI clássico (52), por se ter um maior domínio dessa técnica de controle.

Por se tratar de um sistema complexo, existe uma grande dificuldade em modelar o sistema físico da bancada. Essa dificuldade foi contornada com a utilização de uma técnica de identificação de sistemas dinâmicos lineares (54).

O MATLAB é uma linguagem computacional de alto nível em um ambiente interativo para o desenvolvimento de algoritmos, análise de dados e cálculo numérico (55). Essa ferramenta de desenvolvimento possui uma vasta gama de *toolbox*, ambientes de simulações e ferramentas adicionais para solução de problemas específicos. Para a identificação de sistemas utilizou-se o *System Identification Toolbox*, que tem como função criar modelos matemáticos através das medições de entrada e saída do sistema (56). Outra ferramenta utilizada foi o Simulink (57), plataforma de simulação de sistemas dinâmicos, onde foi simulado e desenvolvido o controlador para o ajuste do ponto de carga.

Através dos vetores, com os sinais de entrada e saída do sistema, e com auxílio do *System Identification Toolbox*, identificou-se o seguinte modelo matemático de segunda ordem, mostrado na equação 5.1.

$$G(s) = \frac{1,09}{0,00066s^2 + 0,0314s + 1} \quad (5.1)$$

Com auxílio do SISOTOOLS (ferramenta para projeto de controlador) e do Simulink, projetou-se um controlador PI discreto, mostrado na equação 5.2

$$C(Z) = 0,056 \cdot \frac{z + 3,62}{z - 1} \quad (5.2)$$

Na figura 5.3 está apresentado um gráfico com a curva de torque do sistema com a utilização do controlador PI proposto, em um ensaio realizado com o motor Maxon EC45 com frequência rotacional de 12000 rpm . Através das curvas apresentadas na figura 5.3, pode-se determinar as seguintes características do controlador: erro nulo em regime permanente, resposta superamortecida (sem sobressinal), $t_{5\%} = 5,2$ s e tempo de subida igual a 4,1 s. Através dessa análise, constatou-se a adequação desse controlador no sistema.

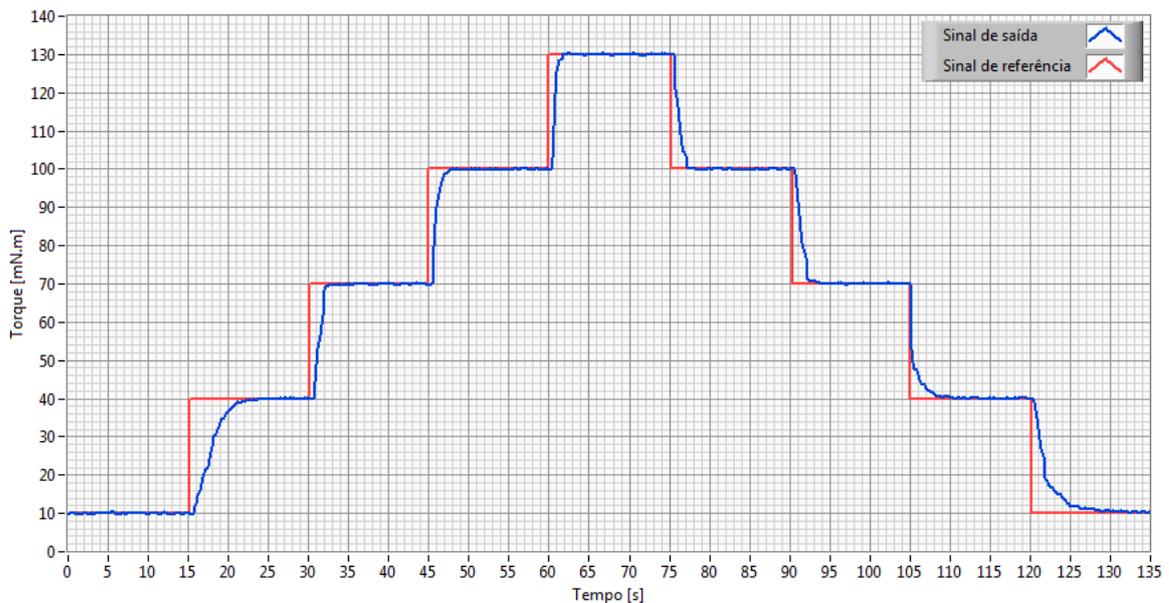


Figura 5.3: Resposta do sistema com um controlador PI

6 *Avaliação experimental da bancada de ensaios*

6.1 Levantamento do comportamento metrológico

A palavra incerteza significa dúvida e, assim, no sentido mais amplo, incerteza de medição significa dúvida acerca da validade do resultado de uma medição (58). Exposta essa definição, fica clara a necessidade de uma indicação quantitativa da qualidade do resultado da medição obtido na bancada, tornando possível avaliar a sua confiabilidade.

Como referência para avaliação das incertezas foi utilizado o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM), que estabelece um método internacionalmente aceito.

O resultado da potência mecânica é obtido através de medição indireta. Dessa forma, a incerteza da medição se torna uma combinação das incertezas das medições primárias, e pode ser descrita pela equação 6.1 (58).

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u^2(x_i) \quad (6.1)$$

onde:

u_c : incerteza padrão combinada;

$u(x_i)$: incerteza padrão avaliada da i-ésima componente da medição;

c_i : coeficiente de sensibilidade da i-ésima variável.

$$c_i = \frac{\delta f(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\delta x_i} \quad (6.2)$$

onde:

c_i = coeficiente de sensibilidade;

x_i = i-ésima componente da medição.

A equação 6.2 descreve como a estimativa da saída y varia com alterações nos valores das estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Tendo em vista a grande importância da qualidade do resultado, é descrita a avaliação da incerteza da medição de potência mecânica e de todas as suas componentes neste capítulo. A expressão para o cálculo da incerteza combinada para a medição da perda mecânica, pode ser expressada pela equação 6.3.

$$u^2(P) = \left(\frac{\delta f}{\delta \omega} \cdot u(\omega) \right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta T} \cdot u(T) \right)^2 \quad (6.3)$$

onde:

P = potência mecânica;

T = torque;

ω = frequência rotacional.

6.1.1 Incerteza na medição de frequência rotacional

Como já descrito no capítulo 3, a frequência rotacional é obtida através de um *encoder* digital incorporado ao transdutor de torque.

A avaliação das incertezas concernentes às várias condições de operação foi realizada através de calibração.

6.1.1.1 Calibração do sistema de medição

Após o sistema de medição (SM) ter sido selecionado e adquirido, ele foi submetido a um procedimento de calibração. Todos os componentes do SM foram deslocados até o Laboratório de Metrologia Elétrica da Eletrosul – Centrais Elétricas, acreditado pelo INMETRO e participante da RBC – Rede Brasileira de Calibração.

Para o experimento foram utilizados como sistema de medição padrão (SMP) os seguintes equipamentos: gerador de função (Fluke) (59), frequencímetro digital (HP) (60).

O procedimento de calibração foi realizado da seguinte maneira:

1. geração de uma onda quadrada através do calibrador Fluke com o primeiro ponto de medição (500 Hz);

2. medição do sinal gerado pelo frequencímetro Fluke por ambos os sistemas de medição;
3. armazenamento dos dados medidos em um arquivo de dados;
4. configuração do calibrador para o próximo ponto de medição (frequência atual + 500 Hz);
5. verificação da frequência configurada, se maior do que a máxima especificada para SM finaliza calibração, caso não seja repete-se os itens anteriores, a partir do item 2.

Após a realização da calibração, foi feita a avaliação metrológica do sistema de medição. Com auxílio dos resultados armazenados durante a calibração foi traçada a curva de erros do sistema de medição, onde foi possível detectar um erro de ganho considerável. Então, para minimizar esse problema, o erro de ganho foi quantificado e compensado. A figura 6.1 mostra as curvas de erro dos sistemas de medição com compensação (SMC) e sem compensação (SM).

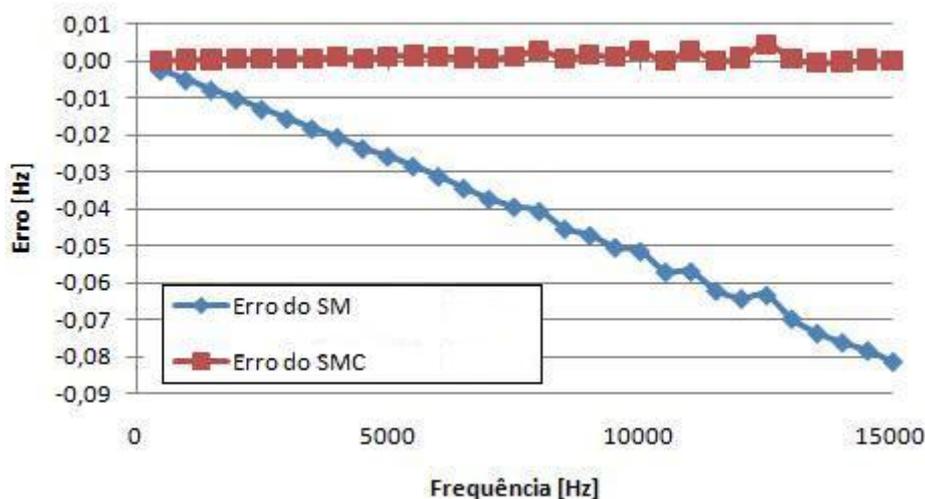


Figura 6.1: Curva de erro do sistema de medição

6.1.1.2 Avaliação das incertezas

Pode-se atribuir a incerteza da medição da rotação às seguintes fontes:

- repetitividade do SMP;
- repetitividade do SM;
- resolução SMP;
- resolução SM;

- incerteza da base de tempo do SMP;
- erro de linearidade.

A função de medição para determinação de frequência rotacional está representada na equação 6.4:

$$\omega = \frac{NA.FB}{NP} \quad (6.4)$$

onde:

NA : número de amostras;

FB : frequência de base;

NP : número total de pulsos detectados;

ω : frequência rotacional.

Devido à característica do método adotado para medição não garantir a mesma incerteza para todos os pontos, foi necessário estimar a incerteza para cada ponto de medição. Para o balanço das incertezas, dividiu-se a faixa de medição em quinze pontos, em intervalos de 1000 rpm, conforme também foi realizado na calibração.

Através das equações já descritas no início deste capítulo, calculou-se a incerteza na medição da frequência rotacional para cada ponto. Os resultados obtidos a partir do balanço das incertezas podem ser visualizados na figura 6.2, onde é mostrada a composição das incertezas da medição de rotação no ponto de 15000 rpm. Na figura 6.3 está apresentada a composição relativa das incertezas para o mesmo ponto, o que permite uma melhor visualização da contribuição de cada fonte de incerteza.

Através da análise dos dados, constatou-se que a incerteza da base de tempo do SMP é a fonte que mais contribuiu para a incerteza do sistema de medição. A incerteza da base de tempo do SMP foi determinada pelo Laboratório de Metrologia da Eletrosul, conforme certificado de calibração mostrado no anexo A.

Através do balanço das incertezas, estimou-se uma incerteza de 0,033 rpm para toda a faixa de medição - aproximadamente 0,00022% do valor final da FM – o que comprovou a excelente característica metrológica do SM. Esse resultado foi muito abaixo do que foi estabelecido como requisito (0,5% do valor final da FM). No apêndice E estão apresentadas as tabelas com o balanço das incertezas para todos os pontos avaliados.

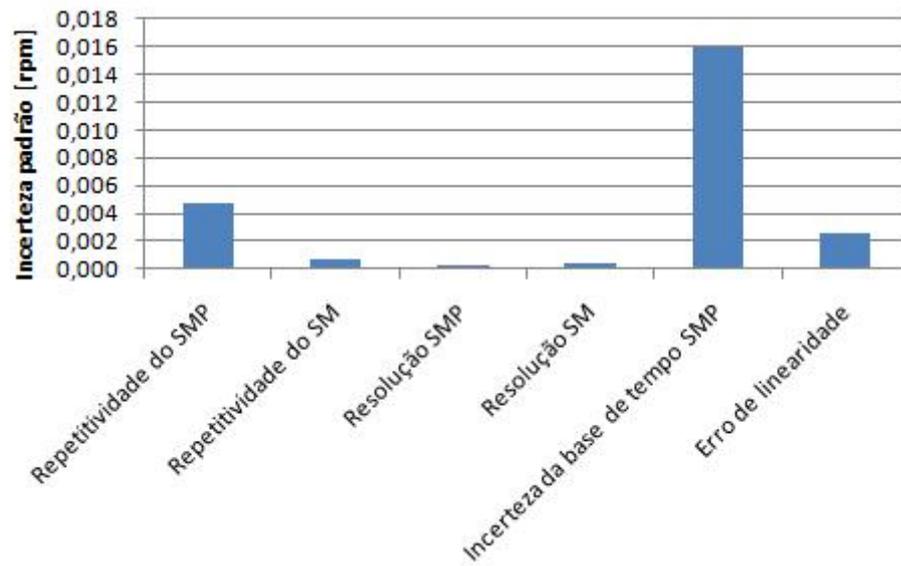


Figura 6.2: Composição das incertezas na medição de frequência rotacional

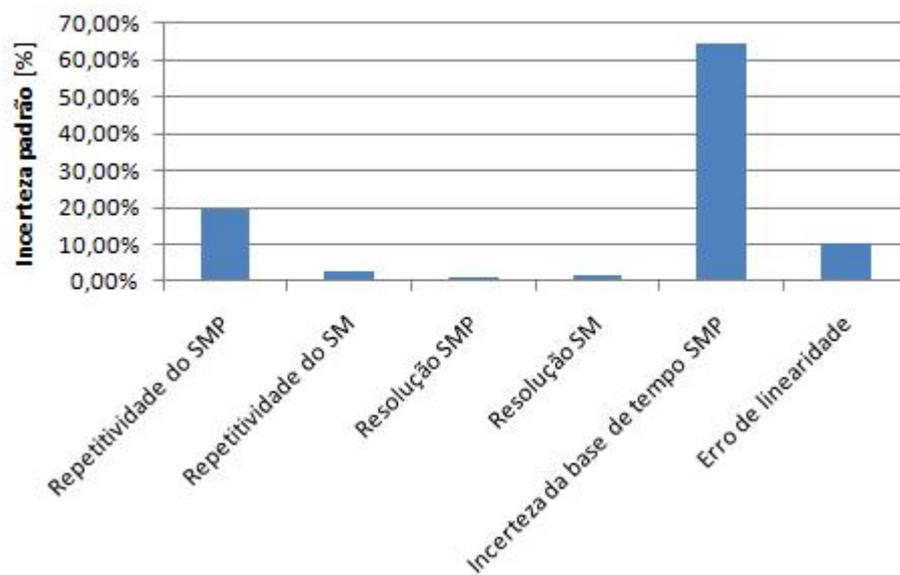


Figura 6.3: Composição das incertezas percentual

6.1.2 Incerteza na medição de torque

No caso da medição de torque, foram consideradas as especificações dos diferentes instrumentos que compõe a cadeia de medição. A avaliação das incertezas foi feita a partir das especificações de catálogo, fornecidas pelos fabricantes.

A cadeia de medição para obtenção do torque é constituída por dois módulos distintos, placa de aquisição e transdutor. Cada um dos equipamentos foi analisado detalhadamente e foram levantadas as suas contribuições para a incerteza.

As fontes de incertezas referentes à placa de aquisição, expressas pelo fabricante (28), podem ser visualizadas na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Fontes de incertezas relativas à placa de aquisição

Placa de aquisição NI 7831R										
Faixa Nominal (V)		Exatidão absoluta					Exatidão relativa			
		% da leitura		Offset (μV)	Ruído + Quantização (μV)		Deriva de temp. (%/K)	Exatidão absoluta para FM (+/-mv)	Resolução (μV)	
Mínimo	Máximo	24 h	1 ano		Ponto simples	Média			Ponto simples	Média
-10	10	0,0496	0,0507	2,542	1779	165	0,0005	7,78	2170	217

As principais fontes de incerteza do transdutor de torque estão apresentadas na tabela 6.2 (7).

Tabela 6.2: Especificações do transdutor de torque

Trasdutor de torque TMHS 303	
Erro combinado (linearidade e histerese)	$< \pm 0,1\%$ da FM
Deriva térmica	$< \pm 0,1\%$ da FM / 10 K
Deriva temporal	$< \pm 0,05\%$ da FM / ano
Deriva devido à frequência rotacional	$< \pm 0,01\%$ da FM / 1000 rpm

Com auxílio da tabela 6.2, avaliou-se as parcelas de incertezas relativas ao transdutor de torque. Uma limitação significativa encontrada nesse transdutor foi a deriva rotacional, que causa um aumento considerável da incerteza combinada na medição de torque para frequências rotacionais mais elevadas, o que se reflete diretamente na medição de potência mecânica. Para minimizar esse problema, foram avaliadas as incertezas para cada ponto de rotação, com passos de 1000 rpm. A seguir, na figura 6.4, está mostrado, graficamente, o efeito da deriva rotacional frente às outras fontes de incerteza.

Offset é outra fonte de incerteza bastante significativa na medição de torque, devido à deriva temporal. Durante os ensaios, percebeu-se que o transdutor detectava uma pequena quantidade de torque, mesmo sem estar submetido à torção. Para eliminar esse efeito indesejável, desacoplou-se o transdutor do restante do sistema e realizou-se um grande número de medições

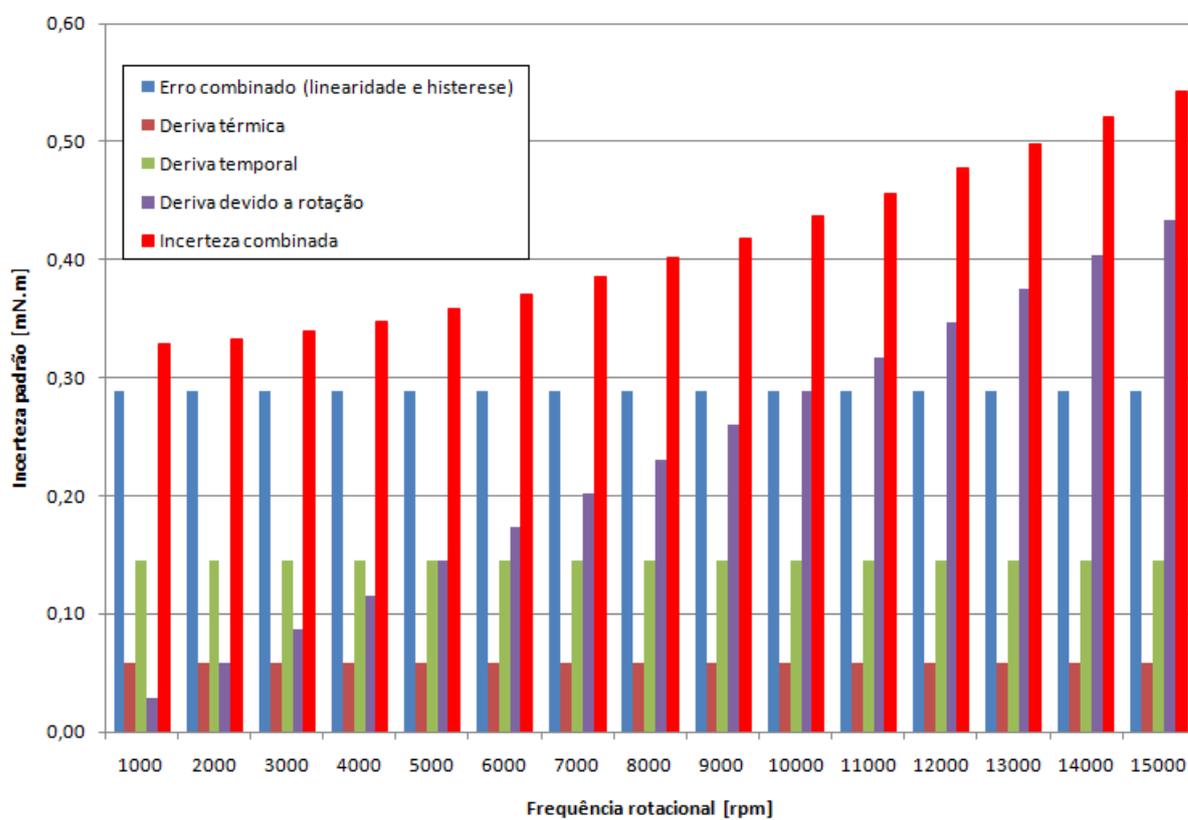


Figura 6.4: Fontes de incertezas do transdutor do torque

(cinquenta). Com o objetivo de minimizar efeitos sistemáticos entre uma medição e outra, torções manuais variadas foram impostas ao sistema antes de cada medição. Através desse procedimento foi possível determinar o *offset* médio e seu desvio padrão, que puderam ser compostos no balanço das incertezas.

Na figura 6.5 está apresentado um gráfico com o balanço das incertezas da medição de torque para o ponto de 15000 rpm que é o pior caso, devido à deriva rotacional. Para esse ponto foi alcançada uma incerteza expandida de 1,67 mN.m; cerca de 0,33% da valor final da FM. Já para um caso menos crítico, com uma rotação de 1000 rpm, a incerteza da medição de torque se reduz para 0,66 mN.m, menos da metade do valor obtido para a condição anterior. Essa foi a causa da opção pela avaliação das incertezas em diferentes pontos.

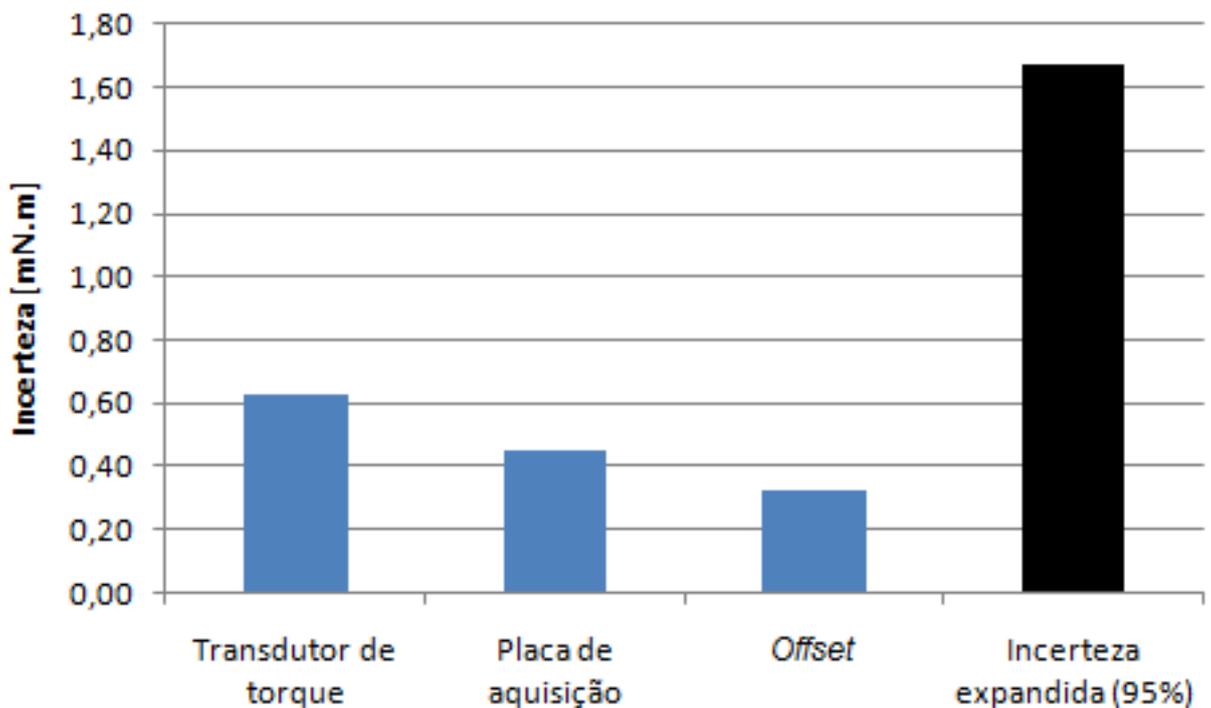


Figura 6.5: Composição das incertezas na medição de torque

Ao final da avaliação metrológica da medição de torque, constatou-se que *offset* e deriva rotacional são as fontes de incerteza mais significativas. Mesmo assim, foi possível alcançar excelentes resultados, se considerados os objetivos traçados. Foi estabelecido como requisito do desenvolvimento da bancada, uma incerteza máxima na medição de torque de 1% do valor final da FM, valor esse muito superior à pior condição de operação (0,33% do valor final da FM).

No apêndice E estão apresentadas as tabelas com o balanço das incertezas para todos os

quinze pontos de frequência rotacional.

6.1.3 Incerteza na medição de potência mecânica

Conhecidas as incertezas relativas ao torque e à frequência rotacional, pode-se facilmente determinar a incerteza relativa à potência mecânica.

Segundo o GUM (58), quando medições de diversas variáveis não correlacionadas são combinadas por uma função matemática contínua e derivável é possível estimar a incerteza da medição através da derivação parcial da equação. No caso da medição de potência mecânica, a incerteza na medição pode ser estimada através da derivada da equação 6.5, que define a potência mecânica.

$$P = k.T.\omega \quad (6.5)$$

onde:

P = potência mecânica;

T = torque;

k = constante de conversão de unidades utilizado para frequência rotacional.

Derivando a equação 6.5, tem-se:

$$U(P)^2 = \left(\frac{\delta f}{\delta \omega} . U(\omega) \right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta T} . U(T) \right)^2$$

Resolvendo as derivadas, chega-se à seguinte equação:

$$U(P)^2 = (k.T)^2 . U(\omega)^2 + (k.\omega)^2 . U(T)^2$$

$$P^2 = (k.T.\omega)^2$$

$$\frac{U(P)^2}{P^2} = \frac{(k.T)^2}{P^2} . U(\omega)^2 + \frac{(k.\omega)^2}{P^2} . U(T)^2$$

$$\frac{U(P)^2}{P^2} = \frac{(k.T)^2}{(k.T)^2 . \omega^2} . U(\omega)^2 + \frac{(k.\omega)^2}{(k.\omega^2) . T^2} . U(T)^2$$

$$\frac{U(P)^2}{P^2} = \frac{U(\omega)^2}{\omega^2} + \frac{U(T)^2}{T^2}$$

Através das manipulações algébricas realizadas, chega-se à equação 6.6.

$$U_r(P)^2 = u_r(\omega)^2 + U_r(T)^2 \quad (6.6)$$

Para levantamento da incerteza da potência mecânica, considerou-se o valor final da FM do SM ($\omega = 15000 \text{ rpm}$ e $T = 500 \text{ mN.m}$). Atribuindo os valores de frequência rotacional e torque desse ponto de carga e as incertezas relativas dos respectivos pontos, na equação 6.6, tem-se:

$$\frac{U(P)^2}{157,05^2} = \frac{0,033^2}{15000^2} + \frac{0,0017^2}{0,5}$$

$$U(P) = 1,3 \text{ W}$$

O ponto de medição que foi avaliado nesse exemplo é o mais crítico do SM, devido à elevada frequência rotacional. A incerteza expandida máxima é de 1,3 W, cerca de 0,34% do valor final da FM. Praticamente toda a incerteza do sistema se deve à medição de torque, a qual contribui com aproximadamente 99,97% da incerteza combinada da potência mecânica. Essa diferença significativa entre as contribuições é devido a excelente característica metrológica do sistema de medição de frequência rotacional. Apesar da parcela de incerteza do torque ser predominante no sistema de medição, ela ainda possui um valor bastante satisfatório para a aplicação. Uma forma de diminuir essa desigualdade seria através da aquisição ou desenvolvimento de um transdutor de torque com características metrológicas muito superiores ao da bancada, porém, através das pesquisas realizadas, não foi encontrado transdutor com características superiores.

Para todas as outras condições, com rotações inferiores, o sistema teve um comportamento metrológico melhor, pois teve uma menor influência da incerteza da deriva rotacional do transdutor de torque.

A figura 6.6 mostra um gráfico com uma curva e uma reta. A reta representa a incerteza estabelecida nos requisitos do projeto e a curva os valores de incertezas alcançados com o SM desenvolvido. Através desse gráfico, pode-se constatar que o sistema de medição desenvolvido possui um comportamento metrológico, ao longo de toda FM, muito superior aos estabelecidos como meta no início do projeto.

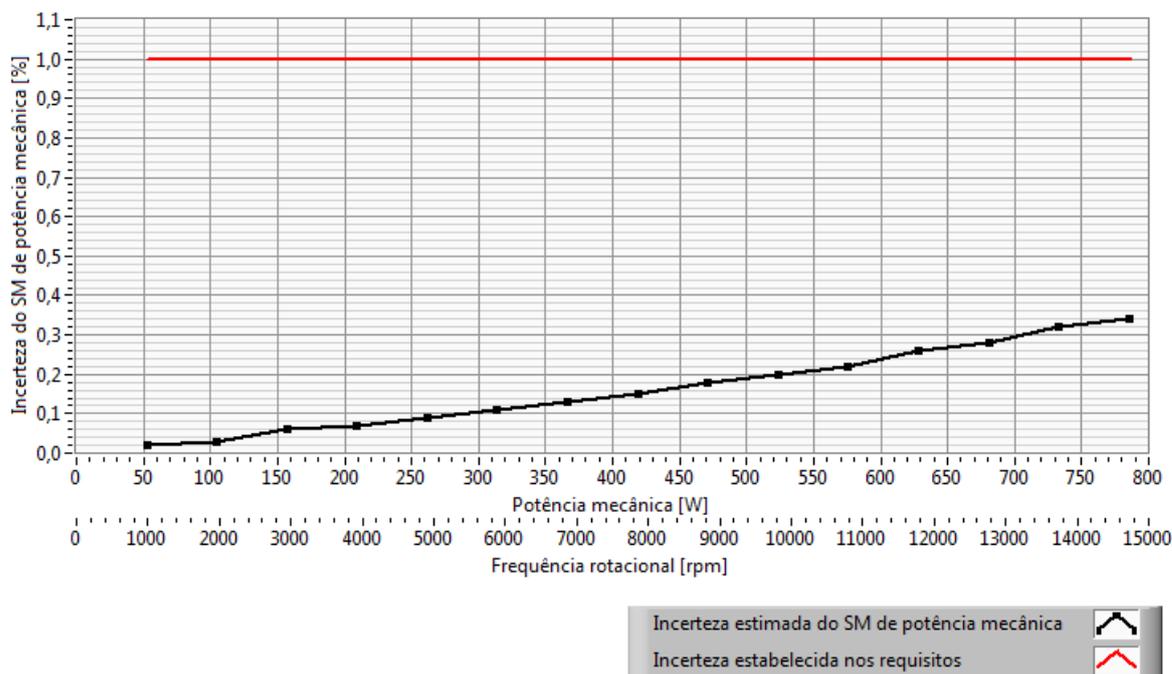


Figura 6.6: Incerteza na medição de potência mecânica com torque de 500 mN.m

6.1.4 Influência do desalinhamento na medição de potência mecânica

Uma análise adicional, feita acerca da medição de potência mecânica, foi a influência do alinhamento dos eixos do motor e do transdutor. Foram feitos testes com quatro níveis de desalinhamento conhecidos e, para cada nível, repetiu-se três vezes os ensaios, chegando a um total de doze. Sabe-se que o desalinhamento máximo suportado pelo acoplamento é de 700 μm , conforme já mencionado na seção 3.4.3. Sendo assim, submeteu-se o sistema aos seguintes níveis de desalinhamento: eixos alinhados; 200 μm ; 400 μm ; 600 μm .

Devido à complexidade da avaliação, foi necessária a criação de um software específico para análise da influência do desalinhamento. Como a potência mecânica é controlada para se manter em um ponto de carga, torna-se inviável a avaliação a partir dessa grandeza. Para contornar esse problema, analisou-se a influência do desalinhamento indiretamente, a partir da medição de rendimento.

A análise é feita pelo software desenvolvido no âmbito desta dissertação da seguinte maneira: primeiro, com o sistema alinhado, é determinado o rendimento do motor; em seguida, é feita a avaliação das incertezas para a potência mecânica em todos os pontos de carga medidos; por fim, é feita uma comparação entre os resultados obtidos com o desalinhamento frente às incertezas na medição de potência mecânica.

A partir da figura 6.7, onde estão mostrados graficamente os resultados das medições realizadas, pode-se observar que, em todos os ensaios, a influência no resultados foi inferior à incerteza de medição. Dessa maneira, pode-se comprovar que a influência do desalinhamento, até um nível próximo ao suportado pelo acoplamento, é desprezível se comparado com a incerteza da medição.

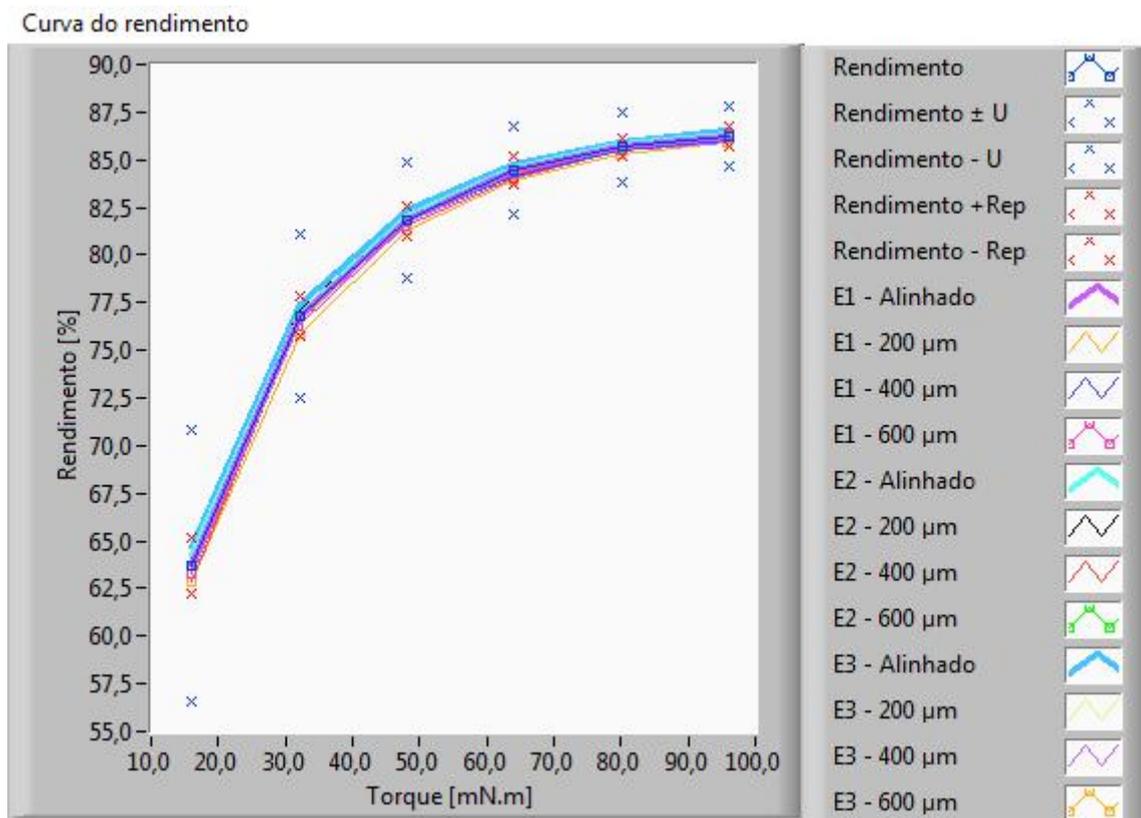


Figura 6.7: Análise da influência do desalinhamento

6.2 Validação da bancada

Para a validação da bancada foram realizados quinze ensaios, com três motores distintos. Foram utilizados os dois motores da Maxon especificados para o projeto e mais um protótipo de um motor *brushless DC*, fornecido pela empresa que serviu de estudo de caso para este trabalho.

Foram realizados quinze ensaios completos para cada tipo de motor. Com o objetivo de evitar componentes de incerteza sistemáticas, os ensaios foram feitos de forma alternada, ou seja, foi feita a troca de motor após o término de uma sequência de três ensaios consecutivos.

Em todos os ensaios, procurou-se manter sempre as mesmas condições de ensaio para cada modelo específico de motor. Os pontos de carga foram mantidos sempre os mesmos para cada

tipo de motor. Cuidou-se para que a temperatura externa do motor permaneça-se constante ao longo de todo o ensaio. Como já mencionado no capítulo 3, um circuito de medição com sensores Pt100 foi utilizado para o monitoramento da temperatura.

O procedimento adotado nos ensaios de validação foi de acordo com o especificado no capítulo 3.

O método de medição de torque para cada ponto de carga é feito de acordo com o diagrama esquemático da figura 6.8.

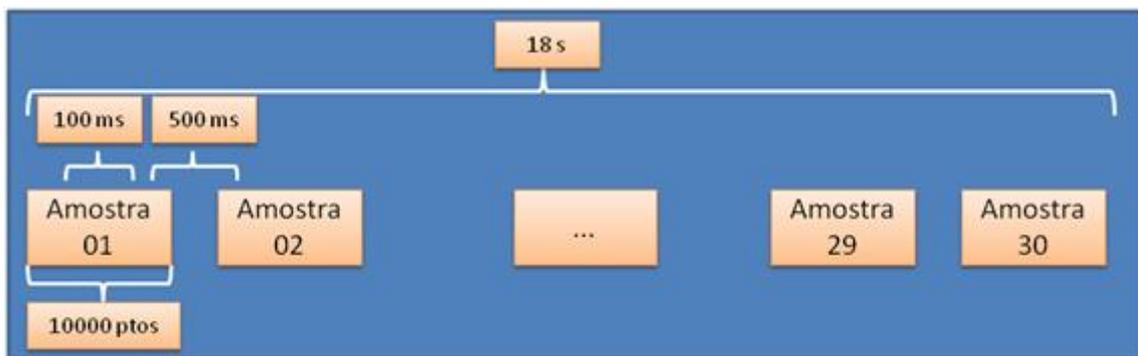


Figura 6.8: Ciclo de medição

A partir da figura 6.8 pode-se observar que cada ciclo de medição é composto por 30 amostras. Cada amostra é obtida a partir de uma aquisição de 10000 pontos, com uma frequência de aquisição de 100 kHz. Desses 10000 pontos é calculada uma média, que é considerada apenas como um ponto de medição médio da grandeza específica, por um período de 100 ms. A dispersão nesse caso é desprezada devido se ter interesse apenas do torque médio. Para efeito dos cálculos de incerteza da medição, no que diz respeito ao levantamento das características de repetitividade natural do sistema, foram analisadas as 30 amostras como sendo o número de medições para cada ponto de carga.

Para medição de frequência rotacional, utilizou-se um contador de pulsos. A partir do valor de frequência rotacional, é calculado o número de pulsos gerados pelo *encoder* do transdutor de torque para um período de 100 ms. Com auxílio dessa informação é determinada a capacidade do *buffer* do contador, que é regulado para ter maior número de amostras possível para o período em questão. Com o tamanho do *buffer* definido, são feitas as aquisições e os devidos cálculos para obtenção da frequência rotacional do sistema.

A cada aquisição de dados realizada são feitos os cálculos para a determinação da potência mecânica, da potência elétrica e do rendimento do motor. Os sinais de temperatura e alinhamento também são medidos ao longo do ensaio. Após a inicialização do ensaio, todas as grandezas medidas e calculadas são salvas periodicamente, de acordo com a frequência de aquisição.

Para os ensaios realizados com o motor Maxon EC45 de 150 W, foram considerados os pontos de carga apresentados na tabela 6.3.

Tabela 6.3: Pontos de carga especificados para o motor Maxon de 150 W

	Frequência rotacional [rpm]					
	15000	12500	10000	7500	5000	2500
Torque [mN.m]	96	115	143	159	162	172
	80	96	119	134	143	153
	64	76	96	108	124	134
	48	57	72	83	105	115
	32	38	48	57	86	96
	16	19	24	32	67	76

Na tabela 6.4, estão apresentados os resultados de medição de um dos ensaios realizados com o motor Maxon EC45 (150 W). Além do valor medido, estão expressos os níveis de incerteza expandida (95%) de cada grandeza medida.

Tabela 6.4: Resultados de medição na rotação de 15000 rpm do motor Maxon de 150 W

Rotação [rpm]	U_{fr} [rpm]	$U_{r_{fr}}$ [ppm]	Torque [mN.m]	U_t [mN.m]	U_{r_t} [%]	Pot. mec. [W]	U_{pot} [W]	$U_{r_{pot}}$ [%]
15000,35	0,51	33,92	95,9	1,8	1,83	150,7	2,8	1,83
15000,32	0,45	29,81	80,0	1,7	2,19	125,6	2,7	2,19
15000,29	0,31	20,43	64,0	1,7	2,73	100,5	2,7	2,73
15000,27	0,30	19,87	48,0	1,8	3,66	75,4	2,8	3,66
15000,27	0,35	23,13	32,0	1,7	5,43	50,3	2,7	5,43
15000,29	0,41	27	16,1	1,8	10,92	25,2	2,8	10,92

Legenda:

U_{fr} – incerteza da frequência rotacional
 $U_{r_{fr}}$ – incerteza relativa da frequência rotacional
 U_t – incerteza do torque
 U_{r_t} – incerteza relativa do torque
 U_{pot} – incerteza da potência mecânica
 $U_{r_{pot}}$ – incerteza relativa da potência mecânica

A partir dos resultados apresentados na tabela 6.4 pode-se observar o baixo nível de incerteza das medições, o que confirma a excelente qualidade metrológica do SM. Os valores das incertezas resultantes desses ensaios foram superiores à estimada para o SM devido ao *ripple* de torque e à frequência rotacional característicos desse tipo de motor.

Conforme mencionado na seção 6.1.2, as incertezas na medição de torque são levantadas a partir da faixa nominal do transdutor. Na medição com o motor de 400 W, especificou-se valores mais elevados de torque – próximos ao valor nominal do transdutor. Portanto, devido aos pontos de carga escolhidos para o ensaio desse modelo de motor – apresentados na tabela 6.5, os resultados dos ensaios apresentaram melhores níveis de incerteza, quando comparados aos do motor de 150 W.

Na tabela 6.6 estão apresentados os resultados de um dos ensaios do motor de 400 W.

Tabela 6.5: Pontos de carga especificados para o motor Maxon de 400 W

	Frequência rotacional [rpm]					
	3500	3000	2500	2000	1500	1000
Torque [mN.m]	497	497	497	497	478	497
	415	417	420	420	401	420
	333	337	344	344	325	344
	251	258	267	267	248	267
	169	178	191	191	172	191
	87	99	115	115	96	115

Tabela 6.6: Resultados de medição na rotação de 3500 rpm do motor Maxon de 400 W

Rotação [rpm]	U_{fr} [rpm]	$U_{r_{fr}}$ [ppm]	Torque [mN.m]	U_t [mN.m]	U_{r_t} [%]	Pot. mec. [W]	U_{pot} [W]	$U_{r_{pot}}$ [%]
3499,73	0,19	53	497,1	1,5	0,29	182,14	0,53	0,29
3499,75	0,24	67,15	415	1,5	0,35	152,06	0,53	0,35
3499,73	0,23	65,21	333	1,5	0,44	122,02	0,53	0,44
3499,73	0,26	72,86	251	1,5	0,58	91,96	0,53	0,58
3499,75	0,2	55,78	169	1,5	0,86	61,94	0,53	0,86
3499,72	0,19	54,23	87	1,5	1,67	31,89	0,53	1,67

Legenda:

U_{fr} – incerteza da frequência rotacional
 $U_{r_{fr}}$ – incerteza relativa da frequência rotacional
 U_t – incerteza do torque
 U_{r_t} – incerteza relativa do torque
 U_{pot} – incerteza da potência mecânica
 $U_{r_{pot}}$ – incerteza relativa da potência mecânica

Conforme já mencionado no início desta seção, realizou-se ensaios com um protótipo de motor fornecido por uma empresa fabricante de compressores. Os pontos de carga aos quais esse motor foi submetido foram estabelecidos em conjunto com a empresa, e são mostrados na tabela 6.7.

Tabela 6.7: Pontos de carga especificados para o protótipo

	Frequência rotacional [rpm]					
	12000	10000	8000	6000	4000	2000
Torque [mN.m]	119	143	155	159	167	159
	99	119	131	135	143	134
	80	96	107	111	119	118
	60	72	84	88	96	102
	40	48	60	64	72	86
	20	24	36	40	48	70

Obteve-se excelentes resultados a partir dos ensaios realizados com o protótipo. Apesar do inversor responsável pelo acionamento desse motor utilizar a comutação *sensorless*, apresentada no capítulo 3, os resultados de medição foram muito semelhantes aos alcançados com o motor Maxon de 150 W. Na tabela 6.8 estão apresentados os resultados obtidos em um dos ensaios realizados com esse protótipo.

Tabela 6.8: Resultados de medição em 12000 rpm do protótipo

Rotação [rpm]	U_{fr} [rpm]	U_{rfr} [ppm]	Torque [mN.m]	U_t [mN.m]	U_{rt} [%]	Pot. mec. [W]	U_{pot} [W]	U_{rpot} [%]
11997,7	9	750,91	118,8	1,8	1,55	149,2	2,3	1,55
11997,4	8,5	709,69	98,9	2,1	2,13	124,3	2,7	2,13
11999,5	10	856,24	80,1	2	2,52	100,7	2,5	2,53
12001,4	11	929,75	60	1,9	3,11	75,3	2,3	3,11
12003,6	14	1153,6	40,1	2,1	5,3	50,3	2,7	5,3
12000,2	18	1472,05	20	2,3	11,34	25,2	2,9	11,34

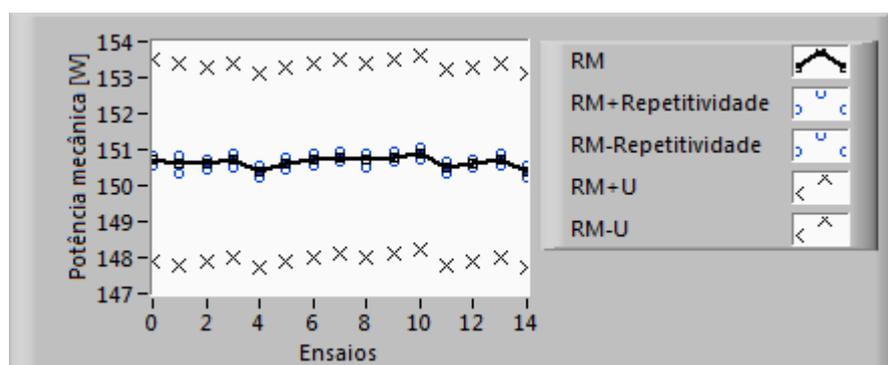
Legenda:

U_{fr} – incerteza da frequência rotacional
 U_{rfr} – incerteza relativa da frequência rotacional
 U_t – incerteza do torque
 U_{rt} – incerteza relativa do torque
 U_{pot} – incerteza da potência mecânica
 U_{rpot} – incerteza relativa da potência mecânica

Ao término de todos os ensaios, analisou-se a reprodutibilidade dos mesmos, com auxílio de um software desenvolvido, no âmbito desta dissertação, em LabVIEW. A ideia do programa é fazer uma comparação da repetitividade entre os ensaios e a incerteza de medição nos respectivos pontos de carga.

Na figura 6.9 estão apresentados graficamente os resultados médios da medição de potência mecânica para quinze ensaios feitos com o motor de 150 W. A linha com os quadrados representa os valores médios de potência mecânica; os círculos representam o valor médio mais ou menos a repetitividade dos ensaios; as cruzes, o valor médio mais ou menos a incerteza expandida da medição (para um intervalo de confiança de 95%) dos respectivos pontos. No gráfico pode-se visualizar, claramente, que a repetitividade das medições, para cada ponto específico, é inferior à incerteza expandida, em todos os quinze ensaios. Para os outros pontos de carga obteve-se comportamento semelhante ao apresentado nesse gráfico, o que permite afirmar que a boa reprodutibilidade está presente em todos os pontos analisados.

Os ensaios realizados em outros pontos de carga e com diferentes motores apresentaram comportamentos semelhantes, igualmente satisfatórios. Esses resultados estão apresentados no apêndice F.

Figura 6.9: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=96 mN.m e $\omega=15000$ rpm

7 *Conclusões e propostas para futuros trabalhos*

7.1 Conclusões

Potência mecânica é uma grandeza muito importante em ensaios de motores elétricos. A medição dessa grandeza auxilia tanto no projeto de novas máquinas elétricas quanto no controle de qualidade desses equipamentos.

O presente trabalho teve como objetivo a medição de potência mecânica em motores elétricos de alta rotação e baixo torque, de forma automática e com baixa incerteza.

No âmbito desta dissertação foram estudados diversos métodos de medição de torque e de frequência rotacional, para a obtenção indireta da potência mecânica. Torque é a grandeza mais crítica em termos de incerteza de medição. Isso requereu maior atenção na escolha do princípio e método de medição utilizados. Na análise das disponibilidades de mercado, um transdutor com princípio indutivo se destacou.

Um sistema para medição de frequência rotacional foi desenvolvido. Para a transdução do sinal utilizou-se um *encoder* digital. O condicionamento e tratamento dos sinais foi feito através do uso de uma placa com tecnologia *field programmable gate array*. Esse sistema de medição foi validado e calibrado em um laboratório integrante da Rede Brasileira de Calibração, portanto, acreditado pelo INMETRO. A incerteza de medição máxima para esse sistema foi de 0,0000022% da faixa de medição, podendo ser considerado estado-da-arte para esse tipo de medição.

A partir da combinação das incertezas de torque e frequência rotacional, avaliou-se para potência mecânica uma incerteza máxima de 0,34% da faixa de medição. Excelente resultado, se comparado com o valor máximo de incerteza estabelecido como requisito.

Adicionalmente à bancada, foi desenvolvido um sistema de visão para a medição e monitoramento do alinhamento dos eixos. Devido aos motores operarem em altíssimas frequências

rotacionais, tornou-se necessária a criação desse sistema de medição, com objetivo de evitar desgastes e danos aos equipamentos da bancada. Incertezas na ordem de décimos de milímetros puderam ser alcançadas; valores esses bem abaixo do limite de desalinhamento suportado pelos acoplamentos.

A bancada foi totalmente automatizada, através do desenvolvimento de um software em LabVIEW. Rotinas para processamento dos dados, controle dos equipamentos, visualização dos dados, controle dos pontos de carga e geração de relatórios foram desenvolvidas. O software desenvolvido mostrou-se adequado para a aplicação. De fácil programação e operação, proporciona uma interface operacional com aspecto profissional, adicionado à possibilidade de se gerar um programa executável para ser utilizado em computadores que não possuam LabVIEW instalado.

A avaliação de incertezas do sistema automatizado mostrou ser de análise bastante complexa e trabalhosa. Todavia, o desenvolvimento de algoritmos de avaliação, através do LabVIEW, contribuiu significativamente para obtenção dos resultados. Dessa maneira, erros de transcrição dos dados também puderam ser evitados. O processamento dos dados via software permitiu obter valores de incerteza da medição relativos a cada ponto de operação, o que aumentou mais ainda a confiabilidade dos resultados.

No balanço das incertezas na medição de potência mecânica, torque representou a parcela mais expressiva. Mesmo assim, os requisitos impostos foram cumpridos satisfatoriamente. A incerteza máxima para essa medição foi estimada em 1,67 mN.m - cerca de 0,33% da faixa de medição, que corresponde a pouco mais da metade do valor estabelecido como requisito.

O presente trabalho também proporcionou um avanço significativo no conhecimento de tecnologias emergentes na área de instrumentação microeletrônica aplicada a motores elétricos de alta rotação e baixo torque.

Todos os requisitos estabelecidos no início da dissertação puderam ser atendidos, ratificando a escolha adequada do processo de medição de potência mecânica e de todos os equipamentos empregados no desenvolvimento da bancada.

7.2 Propostas para futuros trabalhos

Alguns tópicos foram identificados, durante a realização deste trabalho, como merecedores de estudo mais aprofundado ou de aprimoramento do que foi desenvolvido.

A seguir estão apresentadas algumas sugestões de temas a serem explorados em futuros

desenvolvimentos e pesquisas dentro da linha deste trabalho.

A medição de rendimento dos motores é de suma importância. Até o presente momento, as medições de potência elétrica feitas não foram avaliadas metrologicamente. Para tanto, torna-se necessária a especificação e análise de um sistema de medição de potência elétrica, que permita a medição confiável do rendimento dos motores.

Nos ensaios realizados, procurou-se manter a temperatura externa do motor constante, porém, não se utilizou um sistema de controle. É recomendável a criação de um sistema térmico para a climatização do motor, buscando minimizar qualquer influência na medição devido à deriva térmica.

Utilizou-se uma interface RS-232 para a comunicação entre o servo-acionamento do motor e o computador. Uma sugestão é a criação de uma interface RS-232 ou CAN no próprio FPGA, eliminando-se, assim, a necessidade de utilização de uma porta serial.

O sistema de medição e monitoramento do alinhamento foi calibrado para o sistema estático. Por isso, torna-se pertinente fazer uma calibração do sistema em operação. Outra melhoria cabível é a aquisição de mais uma câmera, para a medição do acoplamento em dois planos. Tal medição possibilitaria uma redução significativa no valor da incerteza.

Atualmente as perdas mecânicas relativas aos rolamentos não são determinadas. Fica como sugestão o levantamento das perdas nos rolamentos ou o desenvolvimento de um sistema para a mancalização dos motores, reduzindo significativamente as perdas devido os rolamentos.

Cabe também uma revisão das normas e dos procedimentos de ensaios de motores elétricos do tipo *brushless DC*, brasileiros e internacionais, considerando o estado-da-arte em metrologia e automação da medição.

Referências

- 1 BEIHOFF, B. A survey of torque transduction methodologies for industrial applications. In: *Conference Record of 1996 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 220–229.
- 2 MORRIS, A. S. *Measurement & Instrumentation Principles*. 3. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2001.
- 3 LONSDALE, A.; SCHOFIELD, N. An integrated low cost sensor for the direct torque control of brushless dc motors. In: *Proc. IEE Colloquium on Machines for Automotive Applications (Digest No. 1996/166)*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 6/1–6/7.
- 4 GARSHELIS, I. J.; JONES, C. A. Miniaturized magnetoelastic torque transducers. In: *Proc. IEEE International Magnetics Conference Digest of INTERMAG 99*. [S.l.: s.n.], 1999. p. EF05–EF05.
- 5 SZABADOS, B. et al. A new approach for measurement of the torque-speed characteristics of induction motors. In: *Proc. Fourth International Conference on (Conf Electrical Machines and Drives Publ. No. ??)*. [S.l.: s.n.], 1989. p. 246–250.
- 6 BOLTON, W. *Instrumentation and Control Systems*. [S.l.]: Elsevier Science & Technology Books, 2004.
- 7 MAGTROL. *TM 300 Series In-Line Torque Transducers*. 1. ed. [S.l.], January 2007.
- 8 APPLIED MEASUREMENTS. *Datasheet RTA/RTD Series - Torque Sensor with Non-Contacting Data Transmission System*.
- 9 HBM. *Datasheet T34FN Torque transducers*.
- 10 S. HIMMELSTEIN AND COMPANY. *Datasheet MCRT® 28000T & MCRT® 29000T Low Capacity, Non-Contact mV/V TORQUEMETERS*.
- 11 HONEYWELL. *Datasheet Models 1602 Low capacity torque sensors*.
- 12 INTERFACE. *Model RT13L & RT14L Low Capacity Rotary Transformer Torque Cell*.
- 13 KISTLER. *Datasheet Torque Sensor - Mini-Smart Torque Sensor*.
- 14 SENSOR TECHNOLOGY. *Digital RWT310/320 series Torque Transducer*.
- 15 SCHLENKER. *Datasheet 0160 DM The versatile torque sensor for every speed range*.
- 16 GARSHELIS, I. J. *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. [S.l.]: CRC Press LLC, 1999. Chapter 24 p.

- 17 JR, F. P. B. e E. R. J. *Resistência dos Materiais*. 3. ed. [S.l.]: Pearson Makron Books, 1995.
- 18 HAMMOND, J. M.; LEC, R. M. A non-contact piezoelectric torque sensor. In: *Proc. IEEE International Frequency Control Symposium*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 715–723. ISSN 1075-6787.
- 19 KALININ, V.; BOWN, G.; LEIGH, A. P1k-3 contactless torque and temperature sensor based on saw resonators. In: *Proc. IEEE Ultrasonics Symposium*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1490–1493.
- 20 AGILENT TECHNOLOGIES. *Practical strain gage measurements*. 1999.
- 21 ALEXANDER, C. K. *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. [S.l.]: Bookman, 2006.
- 22 MAXON. *Key information on maxon DC motor and EC motor*. 2007.
- 23 DALLY, W. F. R. J. W.; MCCONNELL, K. G. *Instrumentation for Engineering Measurements*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, INC., 1993.
- 24 BENTLEY, J. P. *Principles of Measurement Systems*. [S.l.]: Longman Scientific & Technical, 1995.
- 25 ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13773 - Termorresistência industrial de platina - Requisitos e métodos de ensaio*. Jan 1997.
- 26 HILL, G. M. High accuracy temperature measurement using rtds with current loop conditioning. *NASA*, Mar 1997.
- 27 MAGTROL. *Datasheet AHB Series Compressed-aircooled Hysteresis Brakes*. 2007.
- 28 NATIONAL INSTRUMENTS. *NI R Series Multifunction RIO Specifications*. 2007.
- 29 NATIONAL INSTRUMENTS. *What Is LabVIEW?* Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/whatis/>>. Acesso em: 05 out. 2009.
- 30 PACKEBUSH, P. Selecting a multifunction data acquisition board for a computer-based measurement system. In: *Proc. 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC '03*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 935–939.
- 31 NATIONAL INSTRUMENTS. *Analog Sampling Basics*. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3016>>. Acesso em: 17 jan. 2008.
- 32 INMETRO. *Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia*. [S.l.: s.n.], 2007.
- 33 NATIONAL INSTRUMENTS. *Data Acquisition Fundamentals*. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3216>>. Acesso em: 28 fev. 2009.
- 34 MAGTROL. *Datasheet BSD Series Miniature Couplings*. 2007.
- 35 LAMBDA. *Programmable DC Power Supplies 750W/1500W in 1U Built-in RS-232 RS-485 Interface IEEE488.2 (GPIB) optional*. 2007.
- 36 MAXON. *Maxon EC motor Technology – short and to the point*. 2007.

- 37 MAXON. *Datasheet 4-Q-EC Servoamplifier*. May 2007.
- 38 MAGTROL. *Datasheet AMF Series Adjustable Motor Fixtures*. 2007.
- 39 ANDERSON, K. F. Current loop signal conditioning: Pratical applications. NASA, 2005.
- 40 MICRO-EPSILON. *Measurement Product Guide 2008*. 2008.
- 41 INTERFACE. *Torquemeter Mechanical Installation*. 2006.
- 42 NATIONAL INSTRUMENTS. *Getting Started with the NI PXI/PCI-1411*. 2007.
- 43 JAI. *Datasheet CV-S3200/S3300 Series – Super Sensitive DSP Color Camera*.
- 44 NATIONAL INSTRUMENTS. *IMAQ Vision Concepts Manual*. [S.l.], Oct 2000.
- 45 NATIONAL INSTRUMENTS. *Training LabVIEW FPGA*. 2007.
- 46 PERRY, D. L. *VHDL: Programming by Example*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.
- 47 NATIONAL INSTRUMENTS. *Serial Communication Overview*. 2007. Acesso em: 02 mar. 2008.
- 48 WILLIAMS, S. R. Test and measurement equipment adopts computer industry standards. In: *Proc. IEEE AUTOTESTCON*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 367–378. ISSN 1080-7725.
- 49 NATIONAL INSTRUMENTS. *A história do GPIB*. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/9925>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- 50 NATIONAL INSTRUMENTS. *LabVIEW FPGA Module User Manual*. [S.l.], 2003.
- 51 NATIONAL INSTRUMENTS. *Técnicas Avançadas de Aquisição de Dados com a linha Placas de Aquisição de Dados Intelligent DAQ*. 2008. Disponível em: <zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6576>. Acesso em: 15 jan. 2008.
- 52 DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Modern Control Systems*. 9. ed. [S.l.: s.n.], 2000.
- 53 SHAW, M. G. S. I. S. *Controle e Modelagem Fuzzy*. [S.l.]: Edgar Blücher LTDA, 1999.
- 54 COELHO, A. A. R.; COELHO, L. dos S. *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*. [S.l.]: Editora da UFSC, 2004.
- 55 MATHWORKS. *MATLAB -Introduction and Key Features*. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/description1.html>>. Acesso em: 25 fev. 2009.
- 56 MATHWORKS. *System Identification Toolbox – Documentation*. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/ident/index.html>>. Acesso em: 04 mar. 2008.
- 57 MATHWORKS. *Simulink – Documentation*. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink/index.html>>. Acesso em: 04 feb. 2008.
- 58 BIPM IEC, I. I. I. I. O. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*. 3. ed. [S.l.]: INMETRO e ABNT, 2003.

- 59 FLUKE. *5520A Multi-Product Calibrator*. Rev. 5. [S.l.], 1998. Operators Manual.
- 60 HEWLETT-PACKARD. *Datasheet HP 5334B*.
- 61 KENWOOD. *Regulated DC Power Supplies PA-A Series*.
- 62 LAMBDA. *Datasheet The Zup Series*.

APÊNDICE A – Especificação dos sistemas de aquisição

A seguir, na tabela A.1 e A.2, estão apresentadas as especificações das placas de aquisições e do módulo *Compact Fieldpoint*, respectivamente.

Tabela A.1: Especificação das placas de aquisição

Modelo	USB-6251	PCI-6024E	USB-6210	PCI-4452	PCI-7831R
Tipo de conexão	USB	PCI	USB	PCI	PCI
Tipo de medição	Tensão, encoder quad.	Tensão	Tensão, encoder quad.	Tensão	Tensão, Filtros, Frequencia, LVDT, RVDT, encoder quad.
Entradas analógicas	8 SE / 8 DI	16 SE / 8 DI	16 SE / 8 DI	4 DI / Simultâneo	8 SE/ 8 DI / Simultâneo
Taxa de amostragem	1,25 MS/s	200 kS/s	250 kS/s	204,8 kS/s	200 kS/s/ch
Resolução	16 bits	12 bits	16 bits	16 bits	16 bits
Memória <i>on-board</i>					80 kB
Cond. de sinal					Filtro Deglitch e Passa baixa
Saídas analógicas	2	2	0		8
Taxa de atualização	2,86 MS/s	10 kS/s	-		1 MS/s
Resolução	16 bits	12 bits	-		16 bits
E/S digitais	24 DIO	8 DIO	4 DI / 4DO		96 DIO
<i>Timing</i>	<i>Hardware</i>	Software	Software		<i>Hardware</i>
Máx. <i>clock rate</i>	1 MHz	-	-		40 MHz
Níveis lógicos	TTL	TTL	TTL		TTL, LVTTTL, 2.5 V, 3.3 V
Contador/ Temporizador	2	2	2		96
Resolução	32 bits	24 bits	32 bits		64 bits
Frequência máxima	80 MHz	20 MHz	80 MHz		40 MHz

Tabela A.2: Especificações do módulo *Compact Fieldpoint* e seus módulos adicionais

Módulo Compact Fieldpoint			
Módulo	FP-AI-100	FP-AO-200	FP-AO-210
Número de canais	8	8	8
Resolução	12 bits	12 bits	12 bits
Tipo entrada/saída	Tensão/Corrente	Corrente	Tensão
Taxa de atualização	360 Hz	200 Hz	200 Hz

APÊNDICE B – Tabela comparativa dos transdutores de torque

B.1 Tabela comparativa dos transdutores de torque

Fabricante	Modelo	Faixa de medição (N.m)	Freq. rotacional máxima (rpm)	Características Técnicas				Deriva devido a freq. rotac. (% FM)	Saída	Sinal de medição da freq. rotacional	Sobrecarga (x FM)
				Erro combinado		Largura de banda (Hz)	Deriva do zero (%FM/°C)				
				Repet. (%)	Lin. (%)						
Applied Measurements	RTA-RTD	0,5	20000	0,05	0,1	0,1	0,005	0,01	5 V	60 TTL pulsos	1,5
	LXT 963	0,35	5000	0,1	0,1	0,1			2 mV/V	opcional	1,5
	420 series	2	8000		0,1		0,002	0,001	10 V	<i>integral magnetic pick off</i>	1,5
	T20WN	0,5	3000		0,2		0,02	0,01	10 V	360 pulsos/rev.	2
HBM	T34FN	1	40000	0,03		0,2	0,01	0,01	de 5 a 15 kHz, 12 V		1,5
	MCR T280000	0,353 / 0,706	25000		0,1		0,001	0,001	1,5 mV/V	512 pulsos/rev. (opcional)	2
Himmelstein	MCR T480000	0,353 / 0,706	25000		0,15		0,0015	0,0017	5 V	512 pulsos/rev. (opcional)	2
	1602-100	0,35 / 0,7	20000	0,05	0,1	0,1	0,0036	0,0036	2 mV/V	60 pulsos/rev.	3
	1102-100	0,35 / 0,7	20000	0,05	0,1	0,1	0,0036	0,0036	2 mV/V	60 pulsos/rev.	1,5
	1701	0,5	37000		0,25		0,02	0,01	10 V	60 pulsos/rev.	2
Interface	T2	0,5	15000		0,1		0,02	0,01	5 V	360 pulsos/rev. (opcional)	2
	T3	0,5	15000		0,1		0,02	0,01	5 V	360 pulsos/rev. (opcional)	2
	T4	0,5	15000		0,2		0,03	0,015	5 V	360 pulsos/rev. (opcional)	2
	T5	0,5	15000		0,2		0,03	0,015	5 V	360 pulsos/rev. (opcional)	2
	T8	0,5	8000		0,25		0,04	0,02	5 V		1,8
	T11	0,5	30000		0,1		0,02	0,01	5 V	6 pulsos/rev. (opcional)	2
	T12	0,5	3000		0,1		0,02	0,01	5 V	360 pulsos/rev. (opcional)	2
Kistler	RT14L	0,35 / 0,7	25000		0,1		0,002	0,002	1,5 mV/V	opcional	2
	4502A0.5H	0,5	7000		0,2		0,015	0,015	5 V	2x360 pulsos/rev. (opcional)	1,5
	45030.5L	0,5	20000		0,1		0,005	0,01	5 V	60 pulsos/rev	1,5
Magtrol	TM303	0,5	20000		0,1		0,01	0,01	10 V	60 pulsos/rev.	2
	4102-01A	0,35 / 0,71	10000	0,02	0,05	0,05	0,0036	0,0036	2 mV/V		3
PCB Piezotronics	RTW310	0,5	30000		0,25		0,05	0,05	5 V	1 atualização/s	2
	E200.ORT	0,5	30000		0,5		0,05	0,05	5 V		2
Sensor Technology	160	0,5	20000		0,2		0,005	0,01	5 V	60 pulsos/rev.	2
	170	0,5	12000		0,2	0,2	0,015	0,015	5 V	2x360 pulsos/rev. (opcional)	1,5

APÊNDICE C – Tabela comparativa das fontes para controle do freio

Tabela C.1: Comparativo das fontes

	Fonte Lambda Genesys (35)	Fonte Kenwood (61)	Fonte Lambda Zup (62)
Modelo	GEN 600-1,3	PA36-3B	ZUP36-6/U
Potência	750 W	175 W	216 W
Tensão	0 a 600 V	0 a 36 V	0 a 36 V
Corrente	0 a 1,3 A	0 a 3 A	0 a 6 A
Regulação	0,01% + 2 mV <i>line/load</i>	2 mV	0,005% + 1 mV
	0,01% + 2 mA <i>line</i>	2 mA	0,01% + 2 mA
	0,01% + 5 mA <i>load</i>	15 mA	0,01% + 5 mA
<i>Ripple</i>		(10 Hz a 1 MHz) 2 mA rms	(5 Hz a 1 MHz) 7,5 mA rms
Tempo de resposta	1 ms	50 μ s	50 ms
Resolução (prog.)	0,012% da faixa (0,16 mA)		0,03% da faixa de saída de corrente (1,8 mA)
Exatidão (prog.)	0,1% da faixa + 0,1% da saída atual (2,6 mA)		0,4% + 40 mA (64 mA)
Resolução (leitura)	0,012% da faixa (0,16 mA)		
Exatidão (leitura)	0,1% da faixa + 0,3% da saída atual (5,2 mA)		
Controle	0 a 5 V, 0 a 10 V via DIP	10 V / 36 V	Internal RS232-RS485
	Switch RS232-RS485	10 V / 3 A	GP-IB/RS485
Opcional	Adaptador GPIB	USB, LXI	
<i>Driver</i>	Labview		-
Garantia	5 anos, prestada pela suplitec		3 anos, fora do Brasil

APÊNDICE D – Fluxograma do software de controle

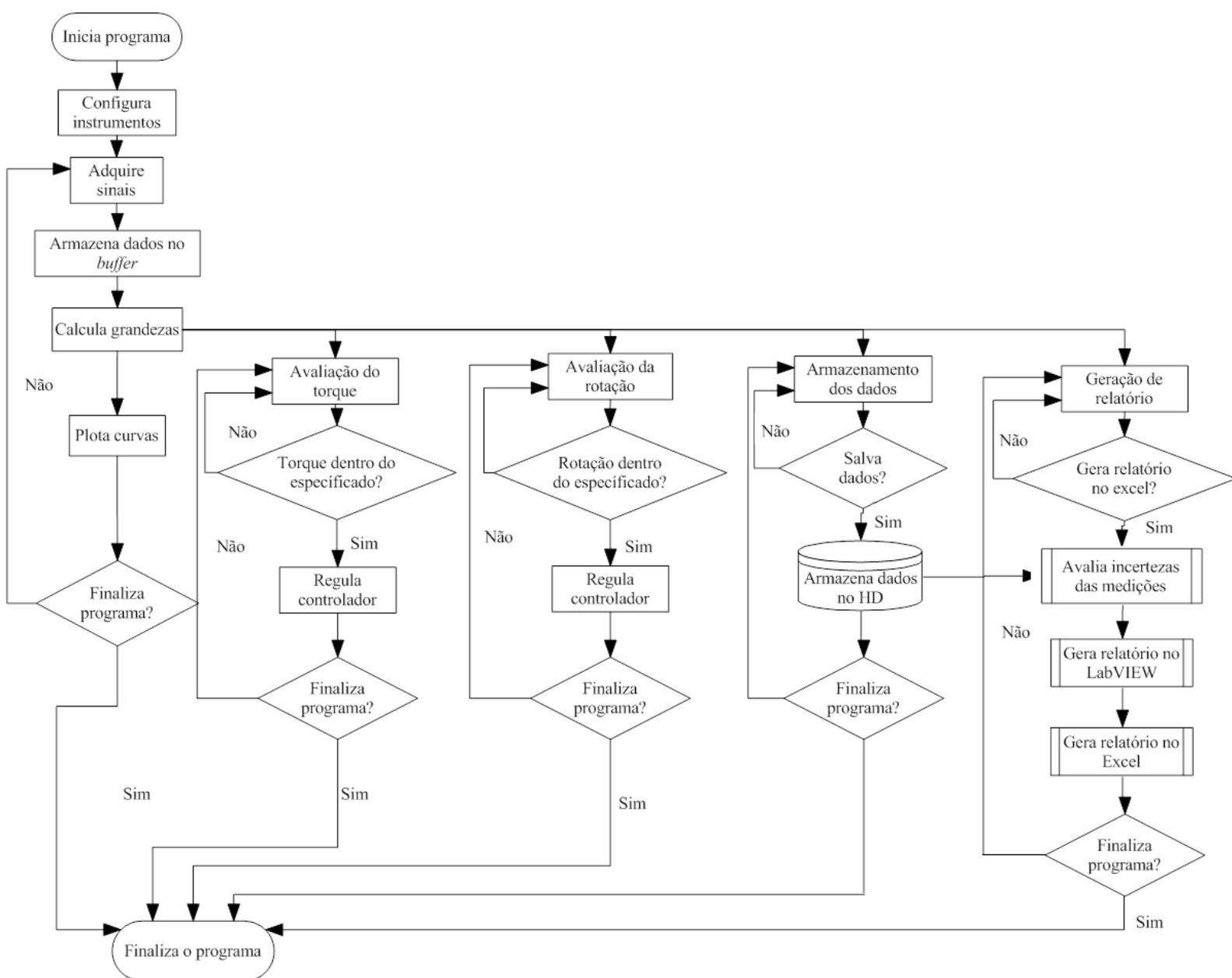


Figura D.1: Fluxograma do software de controle

APÊNDICE E – Balanço das incertezas

Tabela E.1: Balanço das incertezas do SMMA no eixo Y

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [μm]
	Repetitividade do SMP		-	normal		2	8,3
	Incerteza transdutor de deslocamento	-0,0006	0,0003	retangular	2,13	20	0,00014
	Repetitividade do SM		-	normal		2	16
	Resolução SMP		0,00010	retangular		∞	0,000029
	Resolução SM		0,0070	retangular		∞	0,002
	Incerteza no posicionamento X		0,001	retangular		∞	0,0027
	Erro de linearidade		10,26	retangular		∞	5,9
u_c	Incerteza combinada			normal		3	19
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)					3,3	64

Tabela E.2: Balanço das incertezas do SMMA no eixo Z

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [μm]
	Repetitividade do SMP		-	normal		2	42
	Incerteza transdutor de deslocamento	-0,0006	0,0003	retangular	2,13	20	0,00014
	Repetitividade do SM		-	normal		2	42
	Resolução SMP		0,00010	retangular		∞	0,000029
	Resolução SM		0,0070	retangular		∞	0,0020
	Incerteza no posicionamento X		0,006	retangular		∞	0,018
	Erro de linearidade		53,07	retangular		∞	31
u_c	Incerteza combinada			normal		6	67
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)					2,51	168

Tabela E.3: Balanço das incertezas do transdutor de torque (1000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,05	retangular		∞	0,03
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,33
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)					2	0,66

Tabela E.4: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (1000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,66	retangular		∞	0,38
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset			normal		50	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		959	0,67
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,3

Tabela E.5: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (1000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,000083
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,000027
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{resSM}	Resolução SM		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.6: Balanço das incertezas do transdutor de torque (2000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,10	retangular		∞	0,06
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,33
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,67

Tabela E.7: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (2000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,67	retangular		∞	0,38
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset			normal		50	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		973	0,67
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,3

Tabela E.8: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (2000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,00037
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00037
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{resSM}	Resolução SM		0,00020	retangular		∞	0,000058
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.9: Balanço das incertezas do transdutor de torque (3000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,15	retangular		∞	0,09
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,34
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,68

Tabela E.10: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (3000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,68	retangular		∞	0,39
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset				normal		50
u_c	Incerteza combinada			normal		998	0,68
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,4

Tabela E.11: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (3000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,00086
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00023
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{resSM}	Resolução SM		0,00030	retangular		∞	0,000087
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.12: Balanço das incertezas do transdutor de torque (4000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,2	retangular		∞	0,12
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,35
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,70

Tabela E.13: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (4000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,70	retangular		∞	0,40
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset				normal		50
u_c	Incerteza combinada			normal		1032	0,68
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,4

Tabela E.14: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (4000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,000048
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00015
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{resSM}	Resolução SM		0,00040	retangular		∞	0,00012
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.15: Balanço das incertezas do transdutor de torque (5000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,25	retangular		∞	0,14
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,36
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,72

Tabela E.16: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (5000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque		0,72	retangular		∞	0,41
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset	1,8		normal		50	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		1077	0,69
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,4

Tabela E.17: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (5000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,000040
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00025
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{resSM}	Resolução SM		0,00050	retangular		∞	0,00014
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.18: Balanço das incertezas do transdutor de torque (6000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,30	retangular		∞	0,17
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,37
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,74

Tabela E.19: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (6000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,74	retangular		∞	0,43
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset			normal		50	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		1133	0,70
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,4

Tabela E.20: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (6000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,0023
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00019
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{resSM}	Resolução SM		0,00060	retangular		∞	0,00017
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.21: Balanço das incertezas do transdutor de torque (7000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,35	retangular		∞	0,20
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,39
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,77

Tabela E.22: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (7000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,77	retangular		∞	0,44
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset			normal		50	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		1201	0,71
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,4

Tabela E.23: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (7000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,0019
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00021
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{resSM}	Resolução SM		0,00070	retangular		∞	0,00020
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.24: Balanço das incertezas do transdutor de torque (8000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,40	retangular		∞	0,23
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,40
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,80

Tabela E.25: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (8000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,80	retangular		∞	0,46
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset			normal		50	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		1282	0,71
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,4

Tabela E.26: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (8000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,00052
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00043
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,00029
u_{resSM}	Resolução SM		0,00080	retangular		∞	0,00023
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.27: Balanço das incertezas do transdutor de torque (9000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,45	retangular		∞	0,26
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,42
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,84

Tabela E.28: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (9000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,84	retangular		∞	0,48
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset			normal		50	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		1377	0,73
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,5

Tabela E.29: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (9000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,0021
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00044
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,00029
u_{resSM}	Resolução SM		0,00090	retangular		∞	0,00026
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.30: Balanço das incertezas do transdutor de torque (10000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,50	retangular		∞	0,29
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,44
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,87

Tabela E.31: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (10000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque		0,87	retangular		∞	0,50
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset	1,8		normal		50	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		1487	0,75
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,5

Tabela E.32: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (10000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,000075
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00055
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,0010	retangular		∞	0,00029
u_{resSM}	Resolução SM		0,0010	retangular		∞	0,00029
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.33: Balanço das incertezas do transdutor de torque (11000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,55	retangular		∞	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,46
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,91

Tabela E.34: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (11000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,91	retangular		∞	0,53
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset				normal		50
u_c	Incerteza combinada			normal		1614	0,76
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,5

Tabela E.35: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (11000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,0025
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00056
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{resSM}	Resolução SM		0,0011	retangular		∞	0,00032
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.36: Balanço das incertezas do transdutor de torque (12000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,60	retangular		∞	0,35
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,48
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,95

Tabela E.37: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (12000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	0,95	retangular		∞	0,55
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset				normal		50
u_c	Incerteza combinada			normal		1759	0,78
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,6

Tabela E.38: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (12000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,0026
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,0022
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,00010	retangular		∞	0,000029
u_{resSM}	Resolução SM		0,0012	retangular		∞	0,00035
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.39: Balanço das incertezas do transdutor de torque (13000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,65	retangular		∞	0,38
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,50
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,0

Tabela E.40: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (13000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Simbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	1,0	retangular		∞	0,58
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset				normal		50
u_c	Incerteza combinada			normal		1924	0,8
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,6

Tabela E.41: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (13000 rpm)

Simbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,0024
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00045
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,0010	retangular		∞	0,00029
u_{resSM}	Resolução SM		0,0013	retangular		∞	0,00038
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,032

Tabela E.42: Balanço das incertezas do transdutor de torque (14000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Simbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,70	retangular		∞	0,40
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,52
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,0

Tabela E.43: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (14000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Simbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque	1,8	1,04	retangular		∞	0,60
u_{aqs}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset				normal		50
u_c	Incerteza combinada			normal		2110	0,82
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,6

Tabela E.44: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (14000 rpm)

Simbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,0038
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00067
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,0010	retangular		∞	0,00029
u_{resSM}	Resolução SM		0,0014	retangular		∞	0,00040
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,016
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,033

Tabela E.45: Balanço das incertezas do transdutor de torque (15000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Simbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_{ec}	Erro combinado (linearidade e histerese)		0,50	retangular		∞	0,29
u_{dterm}	Deriva térmica (+/- 2 °C)		0,10	retangular		∞	0,06
u_{dtemp}	Deriva temporal (1 ano)		0,25	retangular		∞	0,14
u_{drot}	Deriva devido à frequência rotacional		0,75	retangular		∞	0,43
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,54
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,1

Tabela E.46: Balanço das incertezas do sistema de medição de torque (15000 rpm)

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u [mN.m]
u_t	Transdutor de torque		1,1	retangular		∞	0,63
u_{aq5}	Placa de AQS		0,78	retangular		∞	0,45
u_{off}	Offset	1,8		normal		50	0,32
u_c	Incerteza combinada			normal		2319	0,84
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		1,7

Tabela E.47: Balanço das incertezas do sistema de medição de frequência rotacional (15000 rpm)

Símbolo	Descrição	Erro máximo	a	Distribuição	k	v	u
u_{repSMP}	Repetitividade do SMP		-	normal		29	0,0048
u_{repSM}	Repetitividade do SM		-	normal		29	0,00071
u_{resSMP}	Resolução SMP [8 dígitos]		0,0010	retangular		∞	0,00029
u_{resSM}	Resolução SM		0,0015	retangular		∞	0,00043
u_{bt}	Incerteza da base de tempo SMP		0,032	normal		∞	0,016
u_{lin}	Erro de linearidade (máximo)		0,0044	retangular		∞	0,0026
u_c	Incerteza combinada			normal		∞	0,017
$U = t \cdot u_c$	Incerteza expandida (95%)				2		0,033

As tabelas com balanço das incertezas dos ensaios realizados não estão apresentadas neste apêndice, pois essa avaliação, implementada conforme recomendações do GUM, está integrada ao software de medição. Após cada ensaio os resultados de medição com suas respectivas incertezas são apresentados.

APÊNDICE F – Gráficos com a avaliação da reprodutibilidade dos ensaios

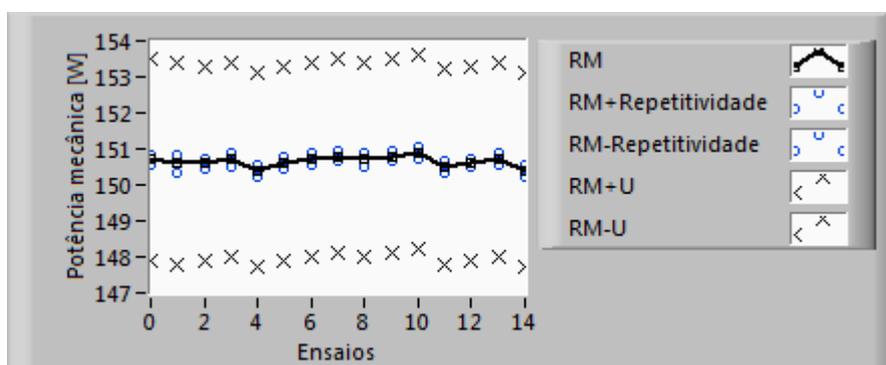


Figura F.1: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=96 mN.m e $\omega=15000$ rpm

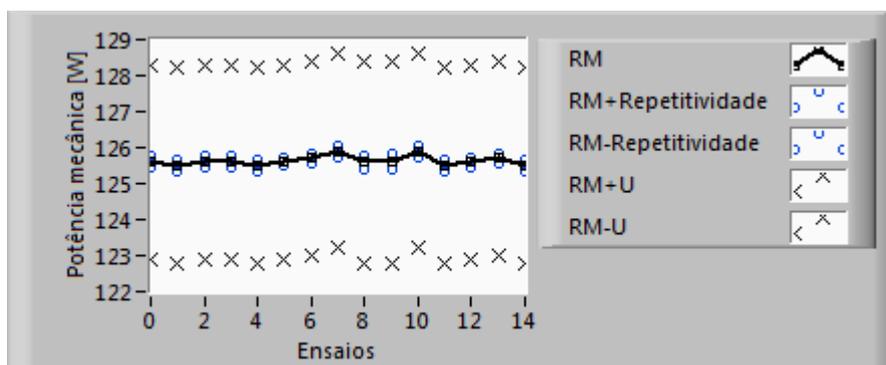


Figura F.2: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=80 mN.m e $\omega=15000$ rpm

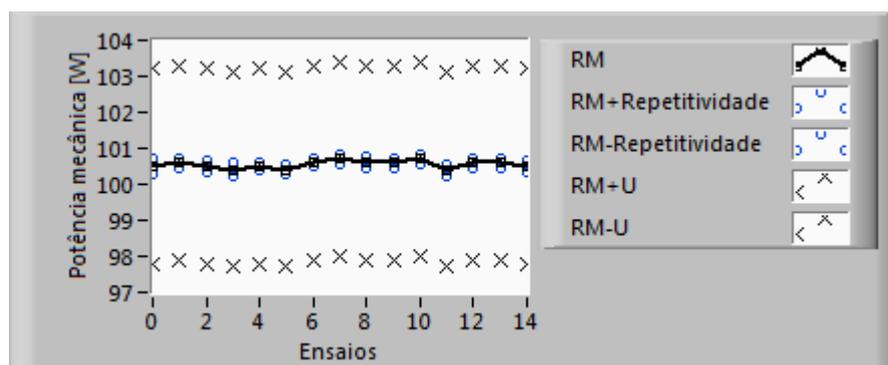


Figura F.3: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=64 mN.m e $\omega=15000$ rpm

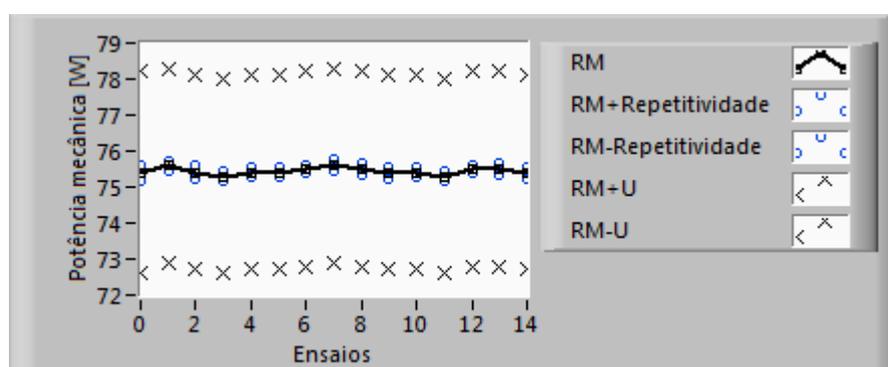


Figura F.4: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=48 mN.m e $\omega=15000$ rpm

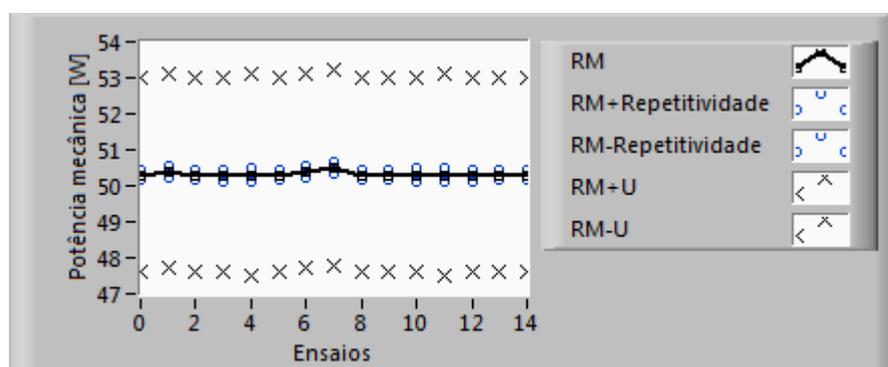


Figura F.5: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=32 mN.m e $\omega=15000$ rpm

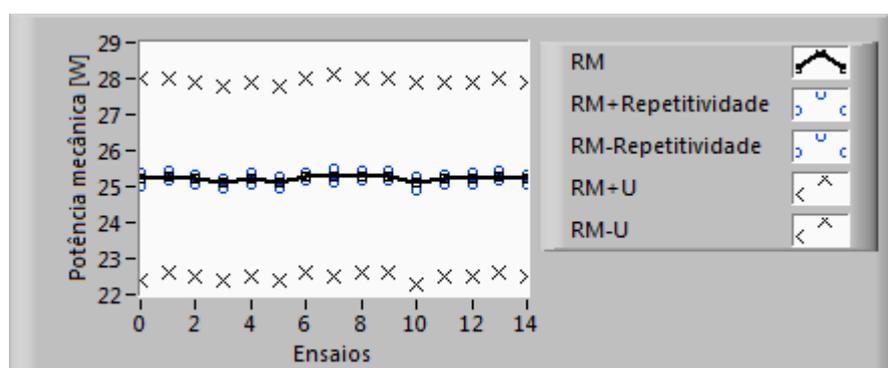


Figura F.6: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=16 mN.m e $\omega=15000$ rpm

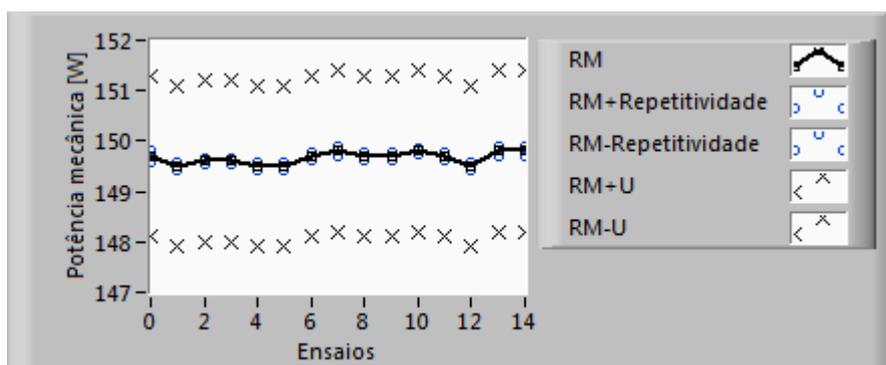


Figura F.7: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=143 mN.m e $\omega=10000$ rpm

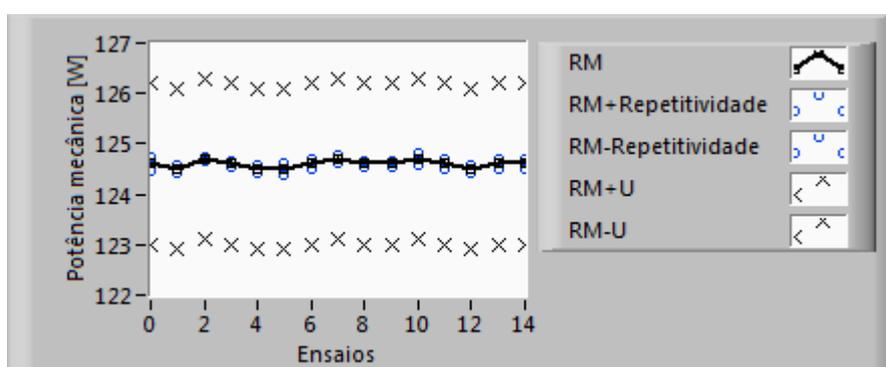


Figura F.8: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=119 mN.m e $\omega=10000$ rpm

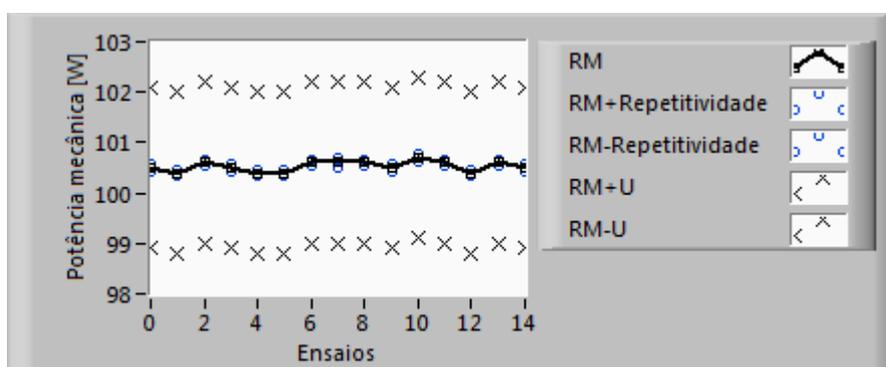


Figura F.9: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=96 mN.m e $\omega=10000$ rpm

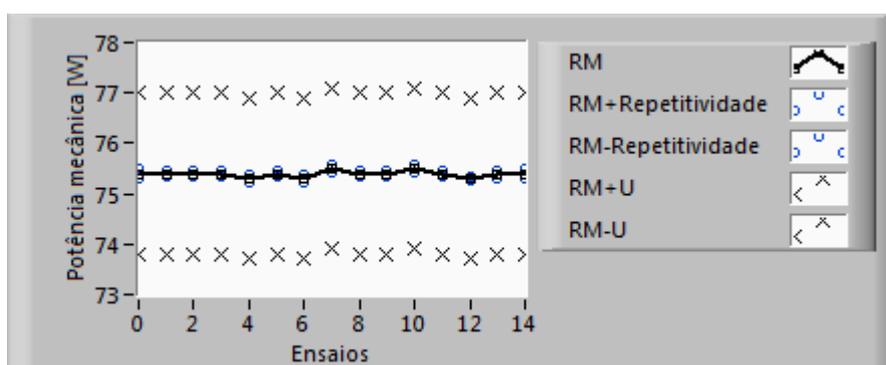


Figura F.10: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=72 mN.m e $\omega=10000$ rpm

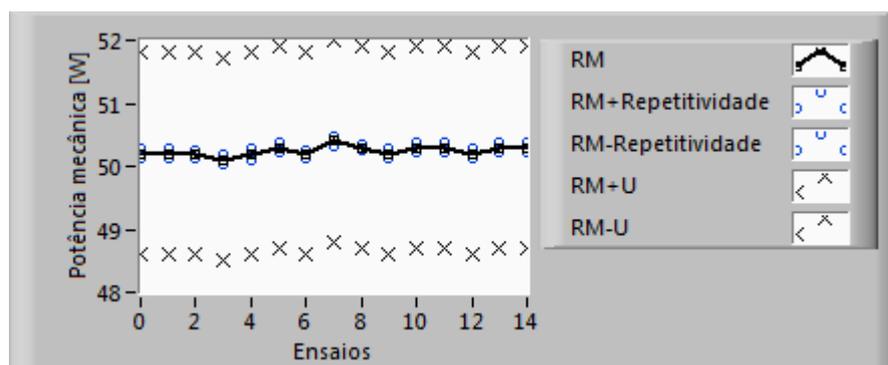


Figura F.11: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=48 mN.m e $\omega=10000$ rpm

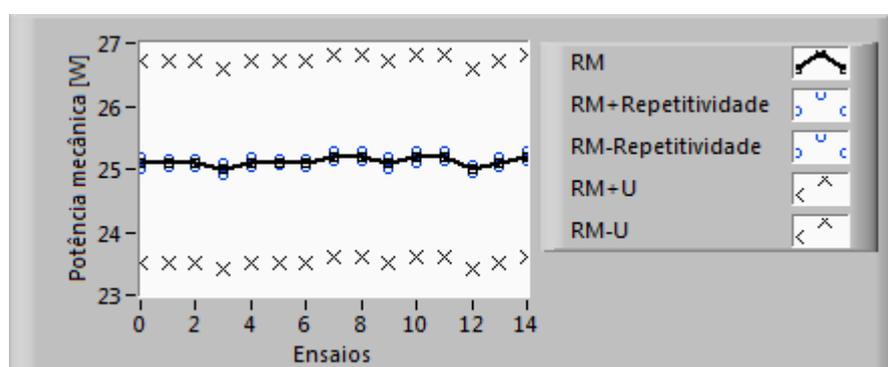


Figura F.12: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=24 mN.m e $\omega=10000$ rpm

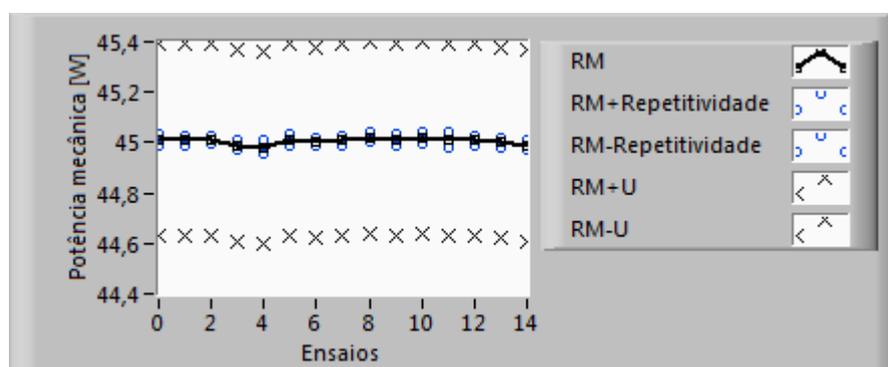


Figura F.13: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=172 mN.m e $\omega=2500$ rpm

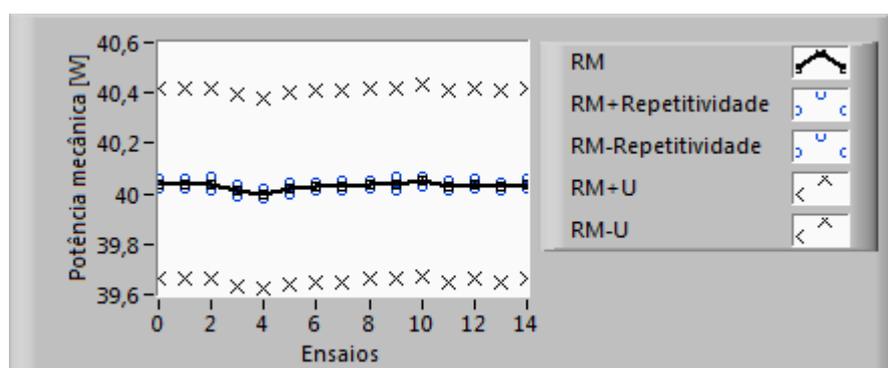


Figura F.14: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=153 mN.m e $\omega=2500$ rpm

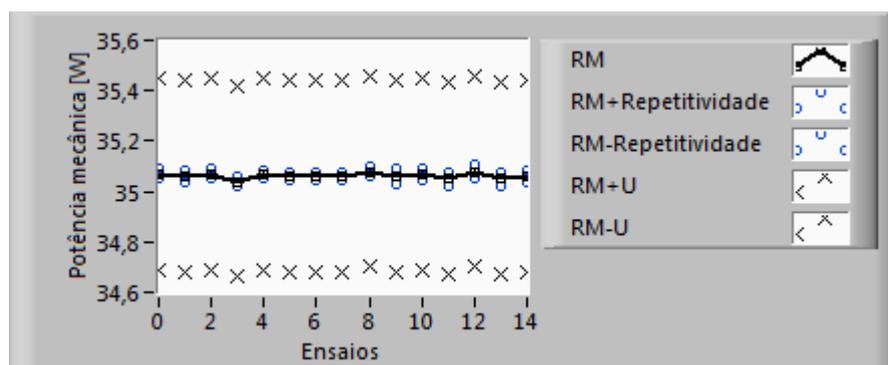


Figura F.15: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=134 mN.m e $\omega=2500$ rpm

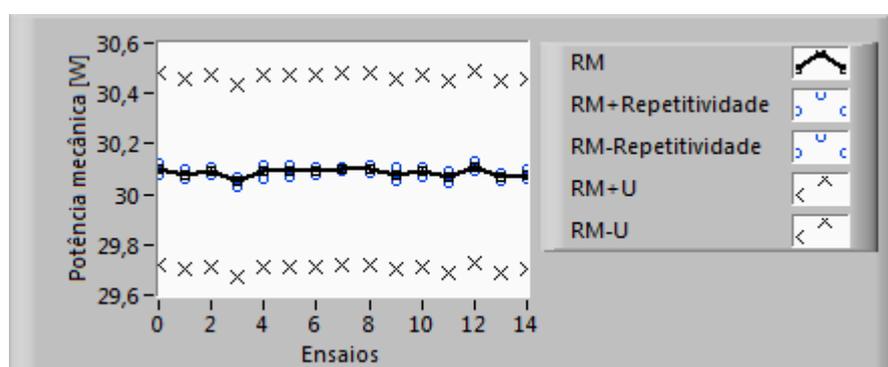


Figura F.16: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=115 mN.m e $\omega=2500$ rpm

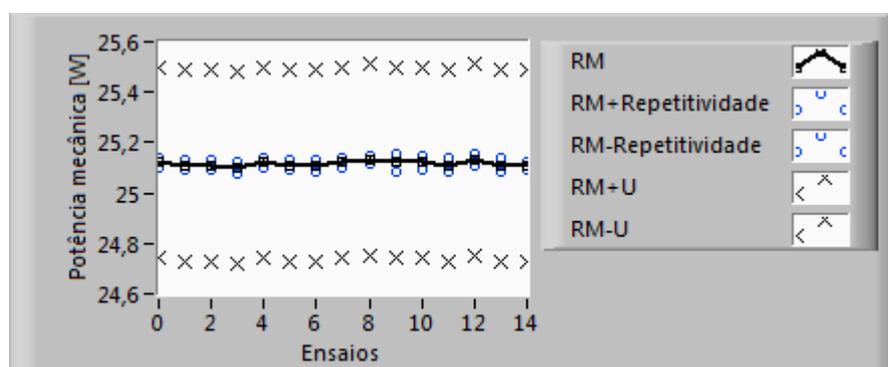


Figura F.17: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=96 mN.m e $\omega=2500$ rpm

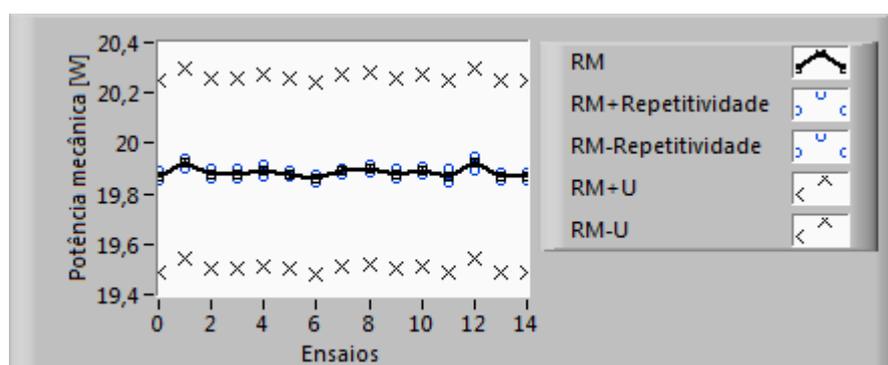


Figura F.18: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC45 – T=76 mN.m e $\omega=2500$ rpm

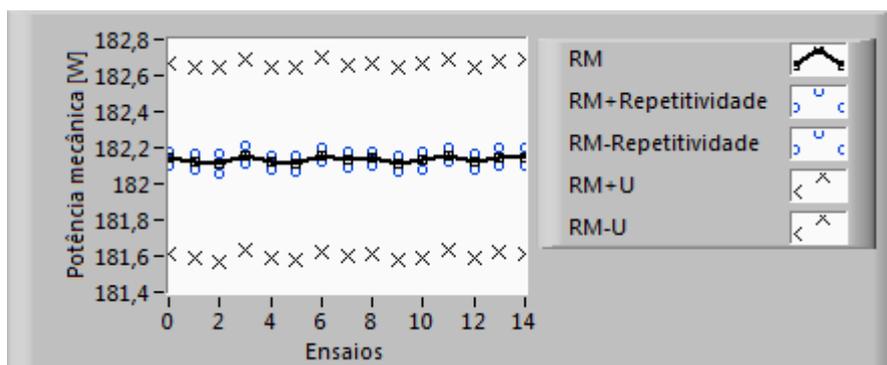


Figura F.19: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=497 mN.m e $\omega=3500$ rpm

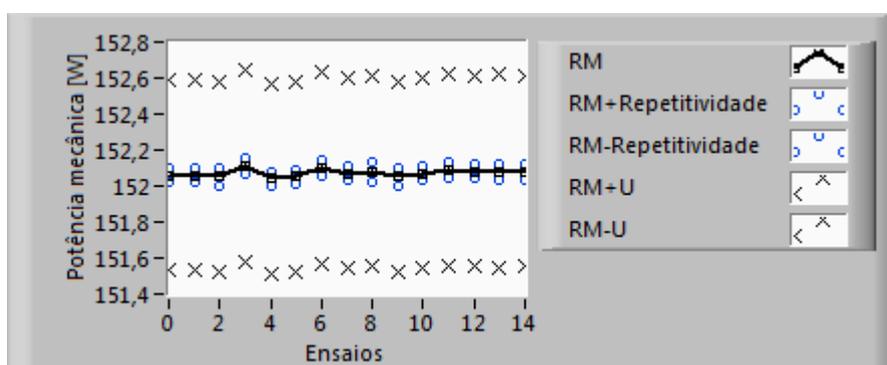


Figura F.20: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=415 mN.m e $\omega=3500$ rpm

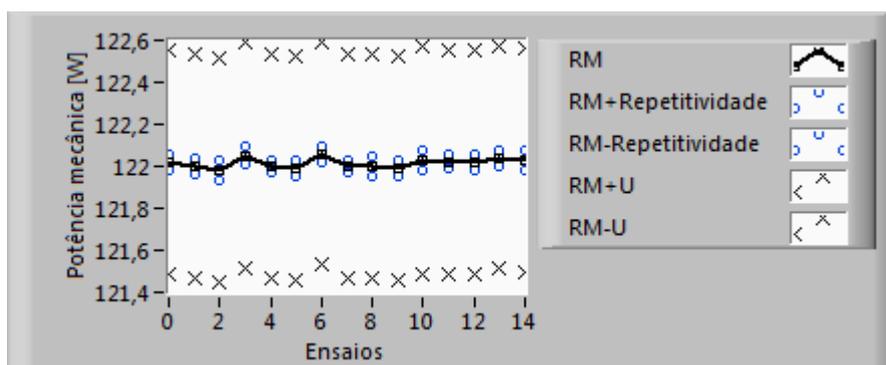


Figura F.21: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=333 mN.m e $\omega=3500$ rpm

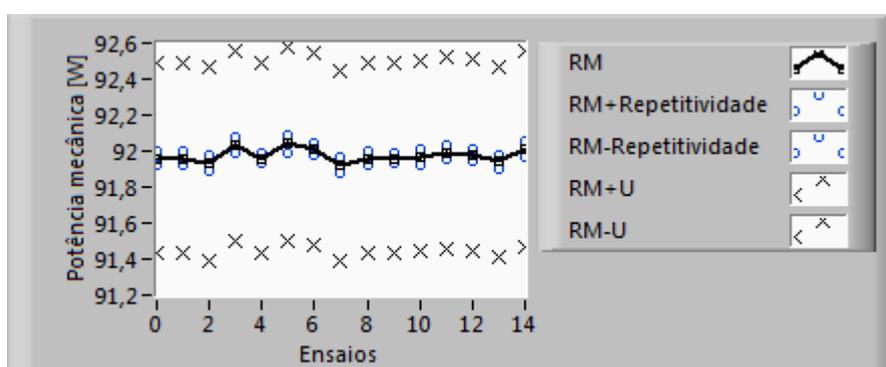


Figura F.22: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=251 mN.m e $\omega=3500$ rpm

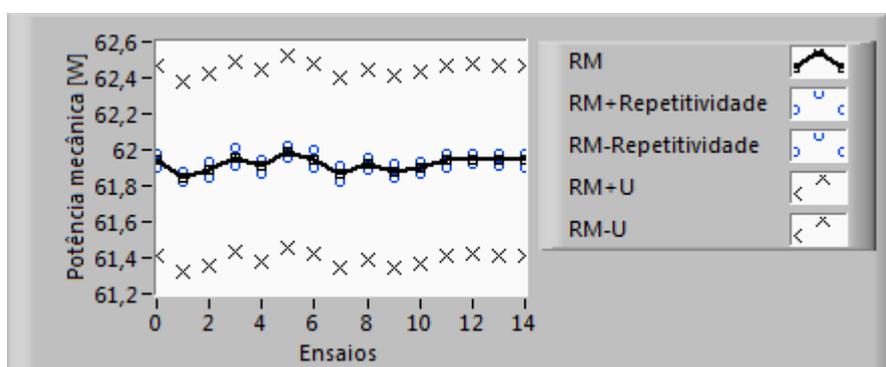


Figura F.23: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=169 mN.m e $\omega=3500$ rpm

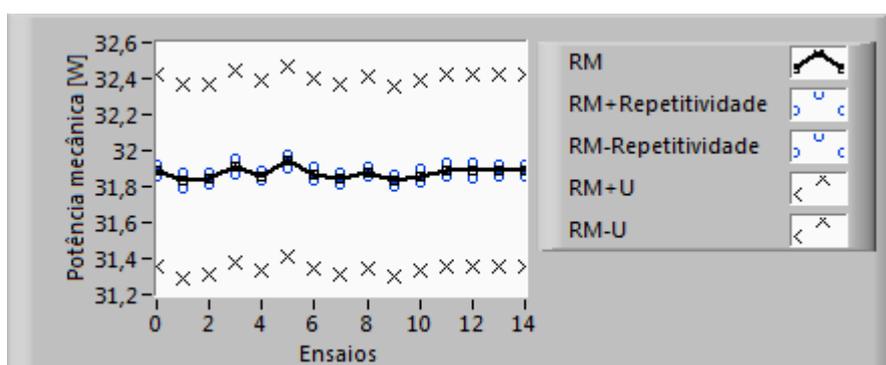


Figura F.24: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=87 mN.m e $\omega=3500$ rpm

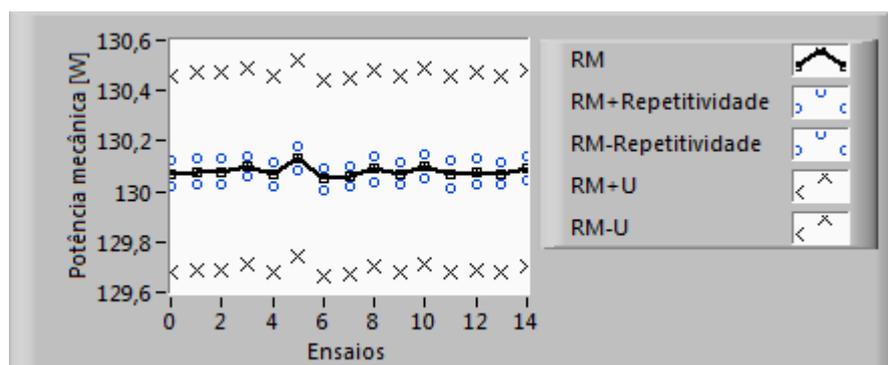


Figura F.25: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=497 mN.m e $\omega=2500$ rpm

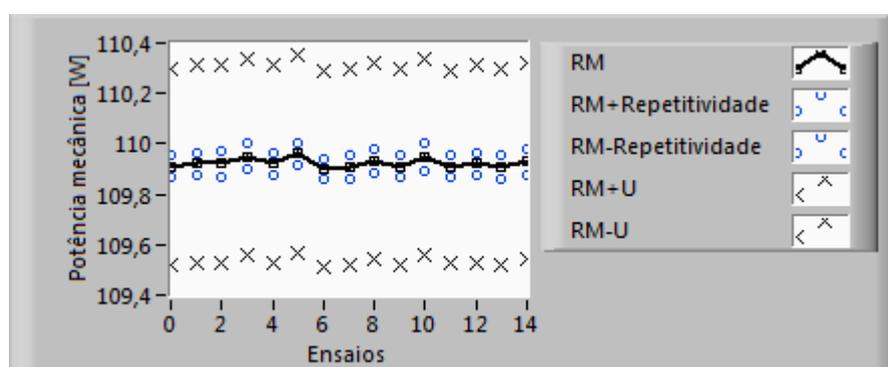


Figura F.26: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=420 mN.m e $\omega=2500$ rpm

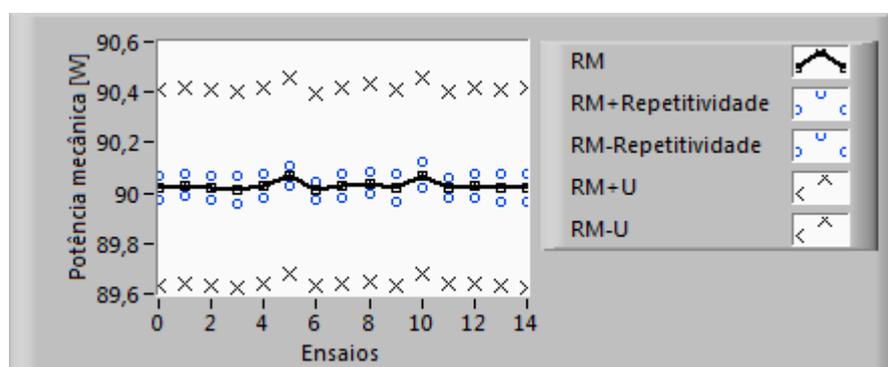


Figura F.27: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=344 mN.m e $\omega=2500$ rpm

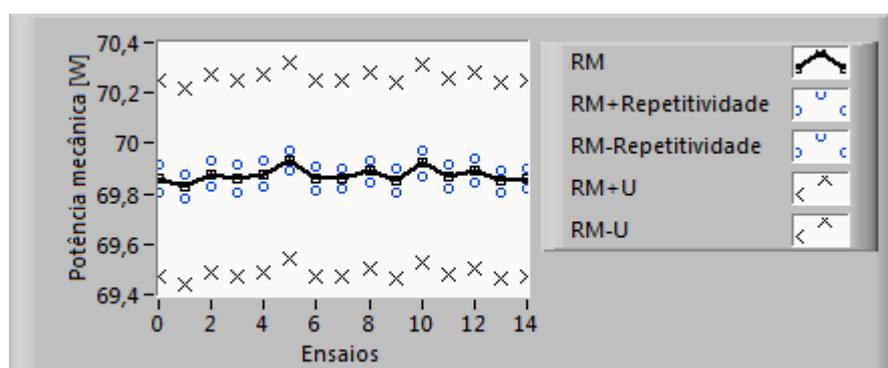


Figura F.28: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=267 mN.m e $\omega=2500$ rpm

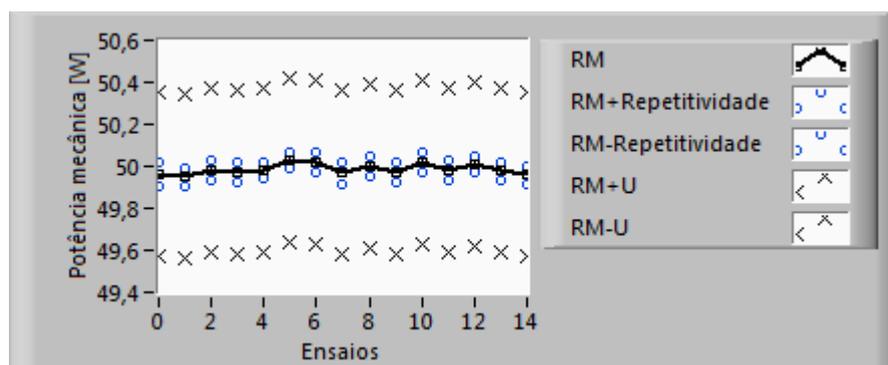


Figura F.29: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=191 mN.m e $\omega=2500$ rpm

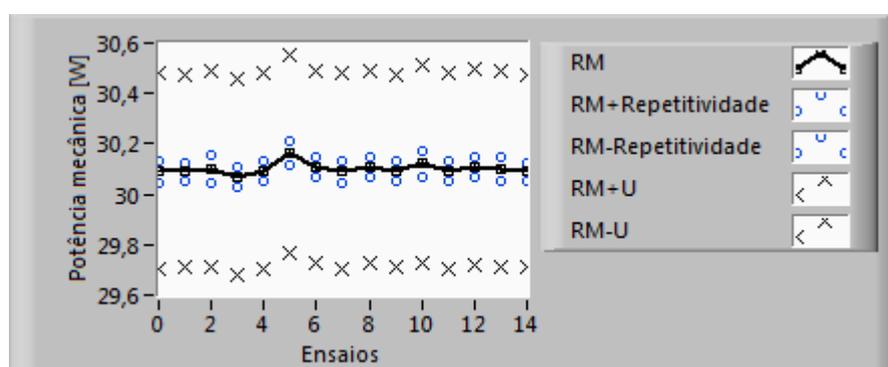


Figura F.30: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=115 mN.m e $\omega=2500$ rpm

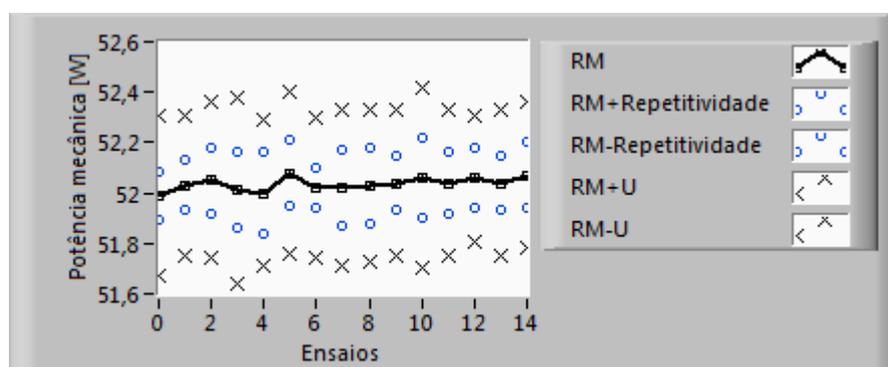


Figura F.31: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=497 mN.m e $\omega=1000$ rpm

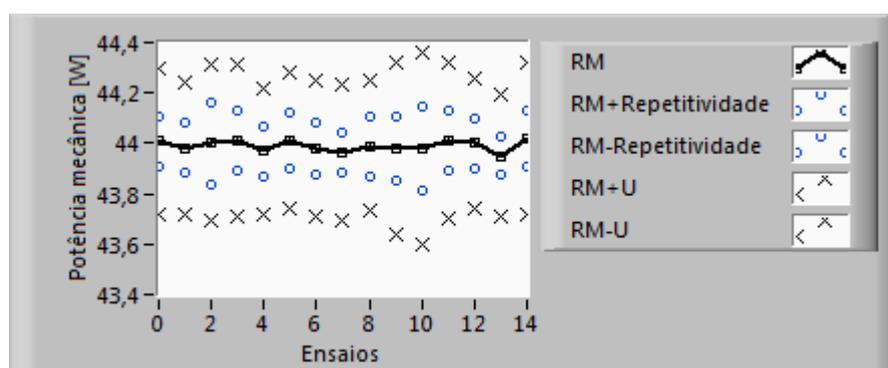


Figura F.32: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=420 mN.m e $\omega=1000$ rpm

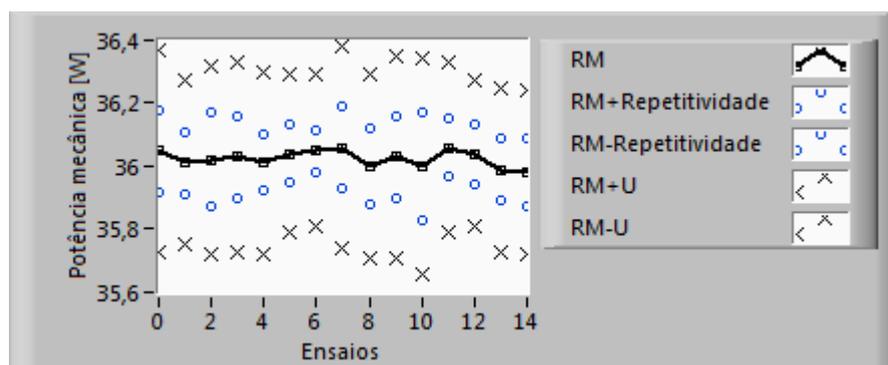


Figura F.33: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=344 mN.m e $\omega=1000$ rpm

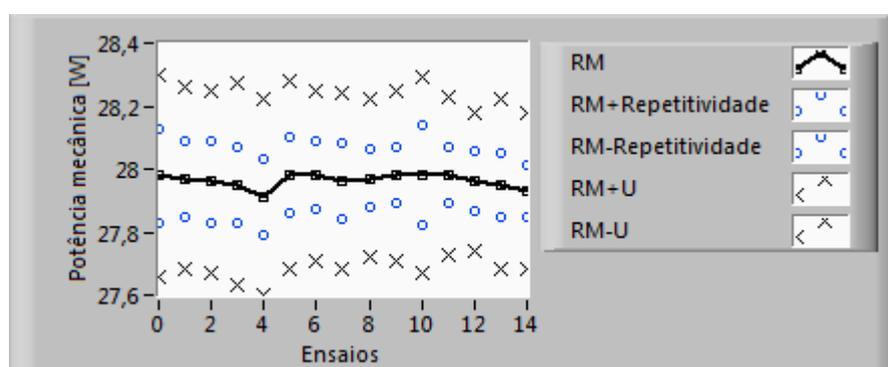


Figura F.34: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=267 mN.m e $\omega=1000$ rpm

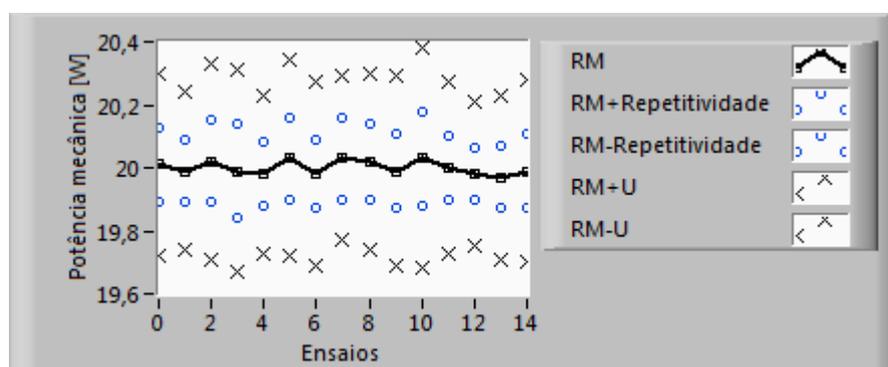


Figura F.35: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=191 mN.m e $\omega=1000$ rpm

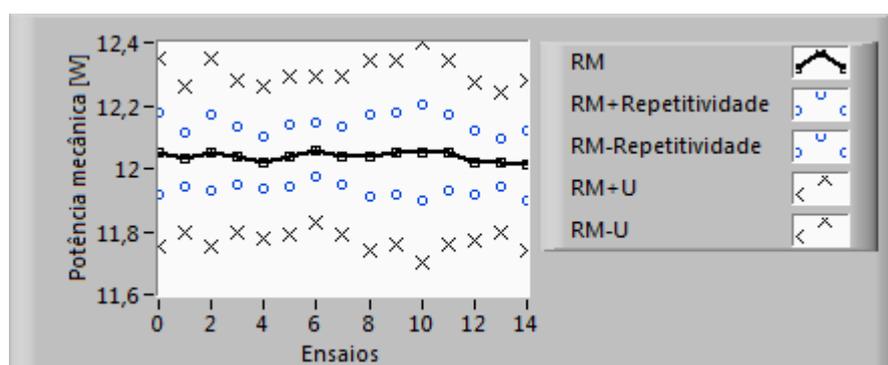


Figura F.36: Reprodutibilidade dos ensaios com o motor EC60 – T=115 mN.m e $\omega=1000$ rpm

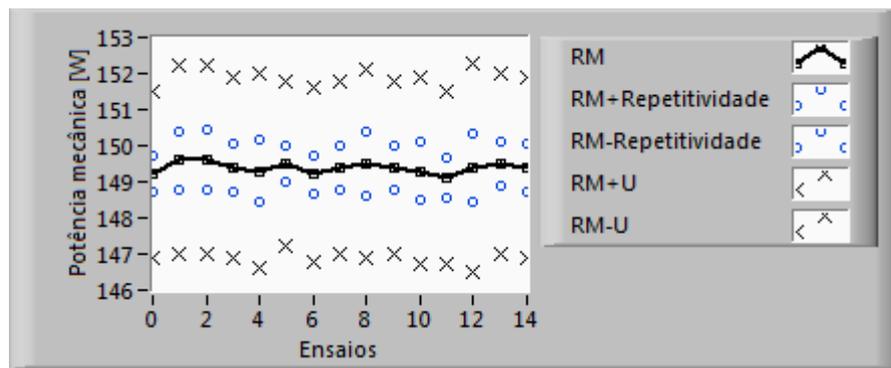


Figura F.37: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=119$ mN.m e $\omega=12000$ rpm

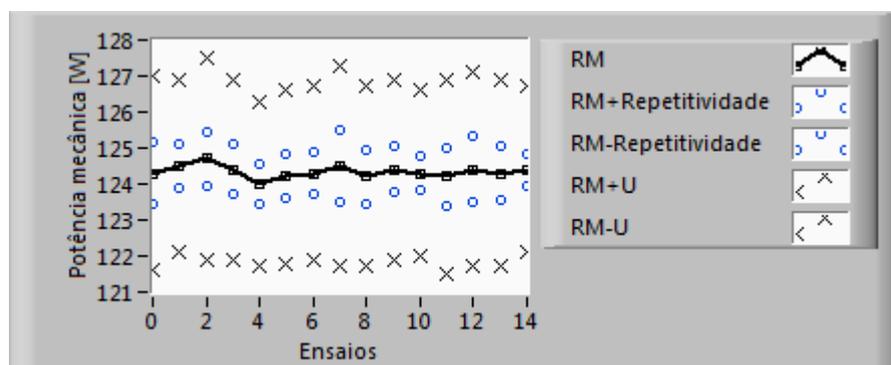


Figura F.38: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=99$ mN.m e $\omega=12000$ rpm

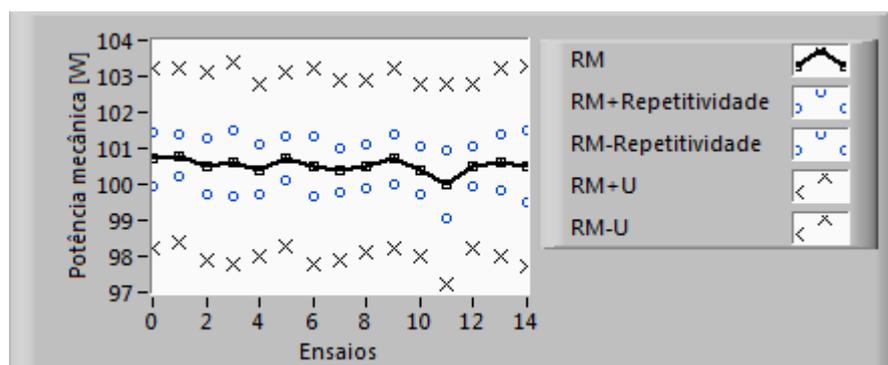


Figura F.39: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=80$ mN.m e $\omega=12000$ rpm

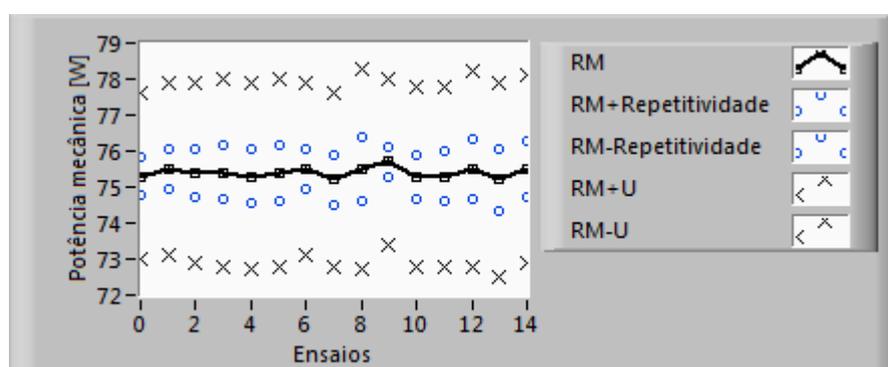


Figura F.40: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=60$ mN.m e $\omega=12000$ rpm

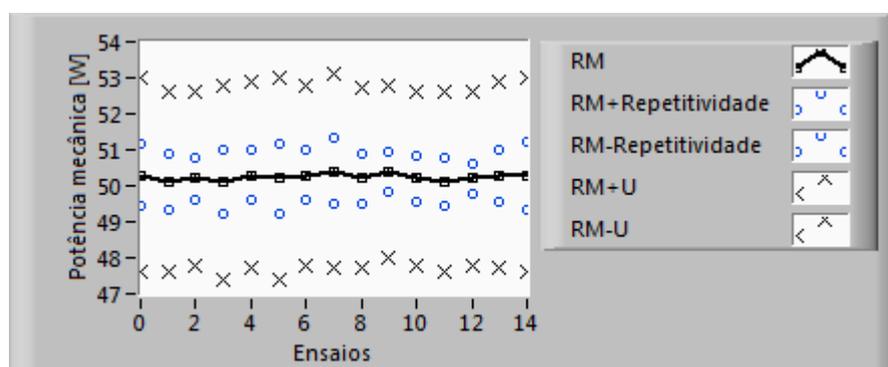


Figura F.41: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=40$ mN.m e $\omega=12000$ rpm

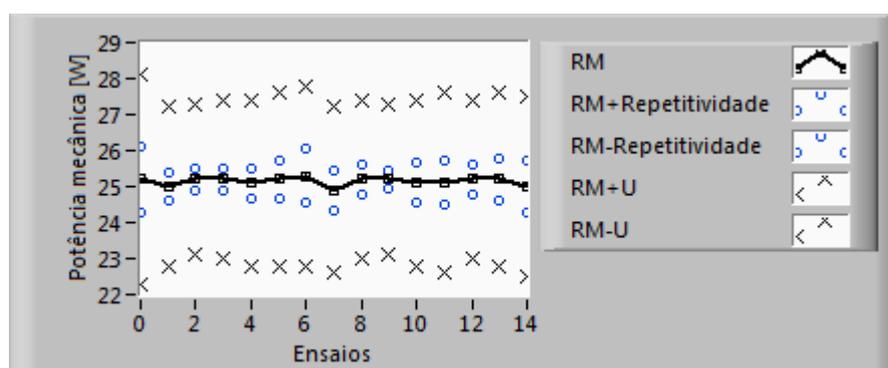


Figura F.42: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=20$ mN.m e $\omega=12000$ rpm

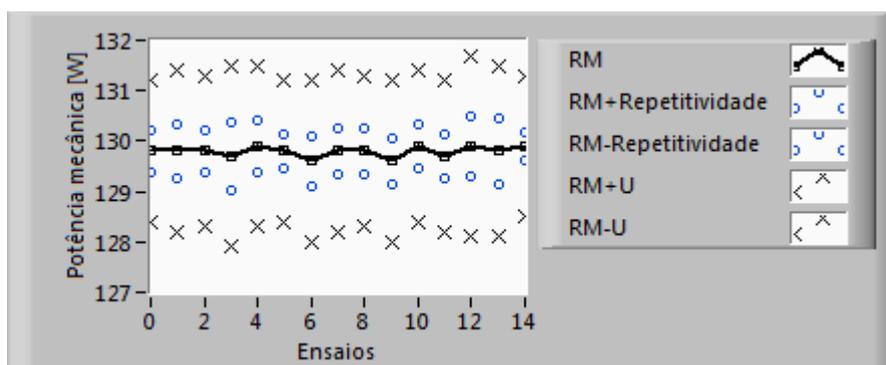


Figura F.43: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=155 mN.m e $\omega=8000$ rpm

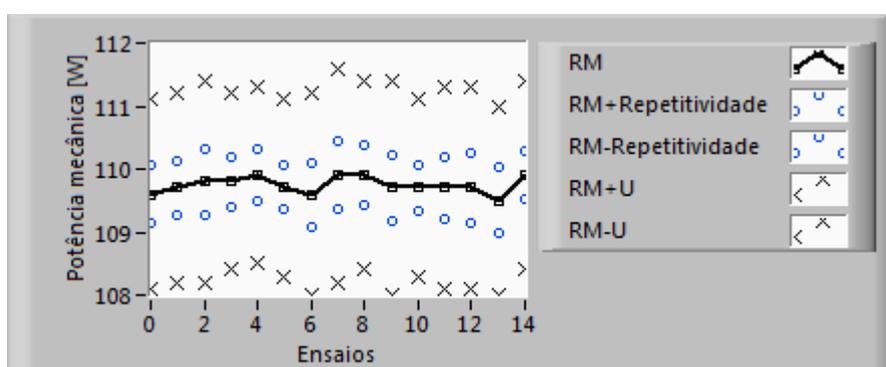


Figura F.44: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=131 mN.m e $\omega=8000$ rpm

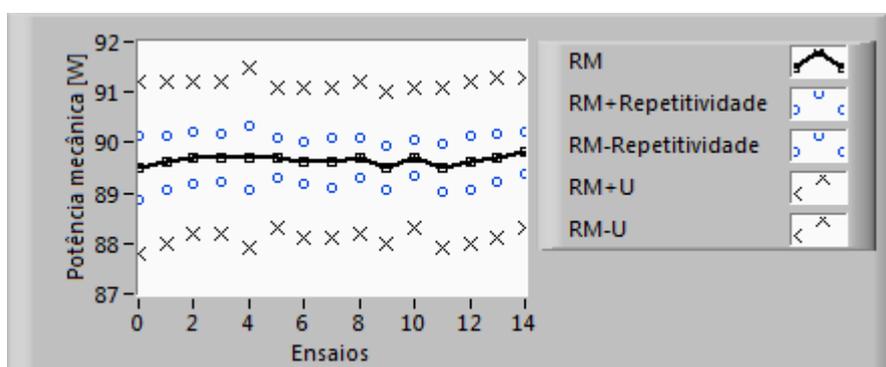


Figura F.45: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=107 mN.m e $\omega=8000$ rpm

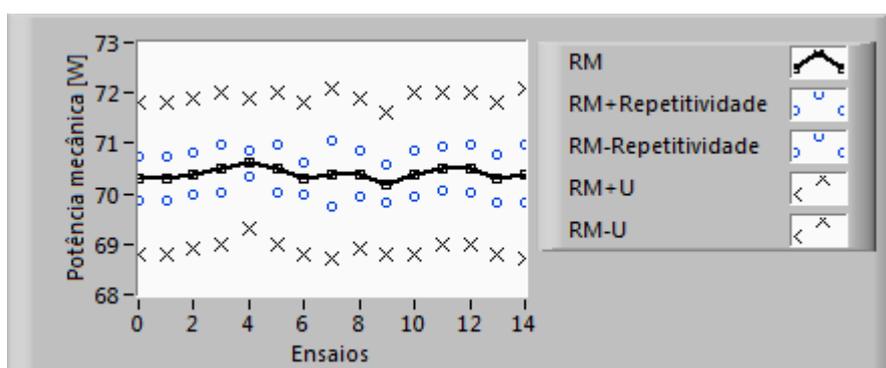


Figura F.46: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – T=84 mN.m e $\omega=8000$ rpm

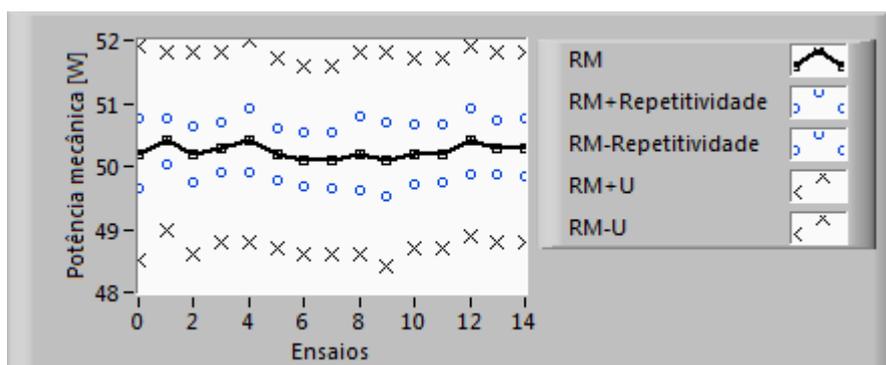


Figura F.47: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=60$ mN.m e $\omega=8000$ rpm

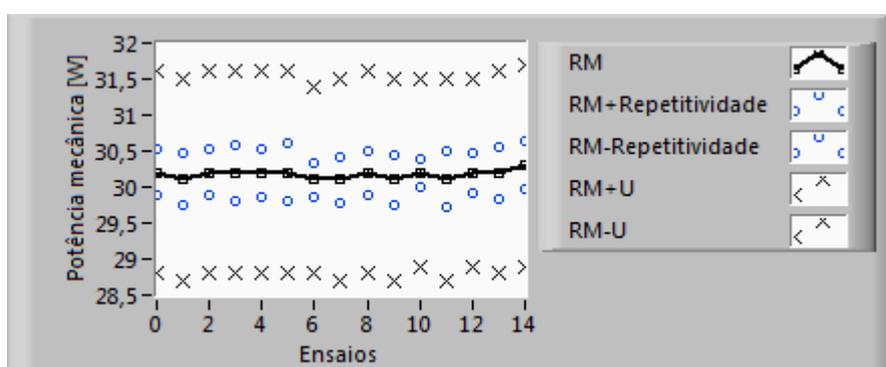


Figura F.48: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=36$ mN.m e $\omega=8000$ rpm

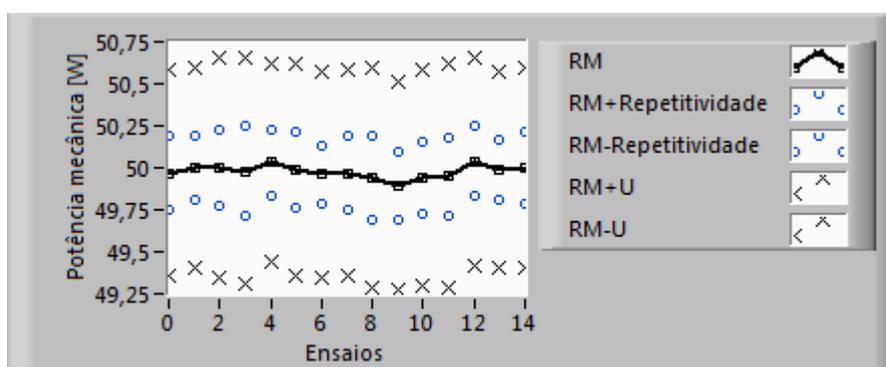


Figura F.49: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=159$ mN.m e $\omega=3000$ rpm

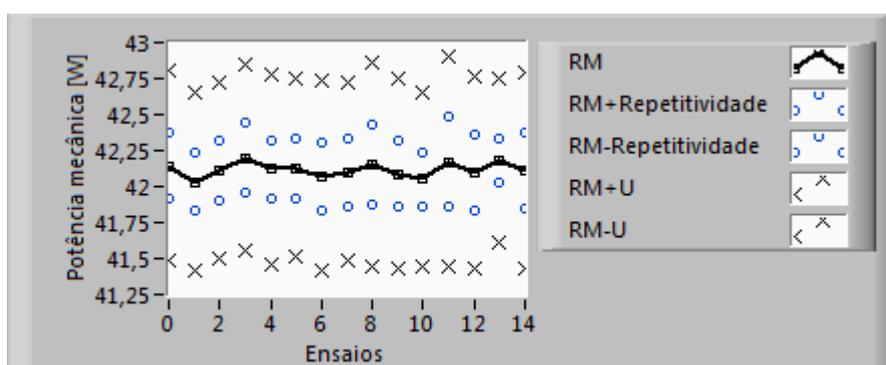


Figura F.50: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=134$ mN.m e $\omega=3000$ rpm

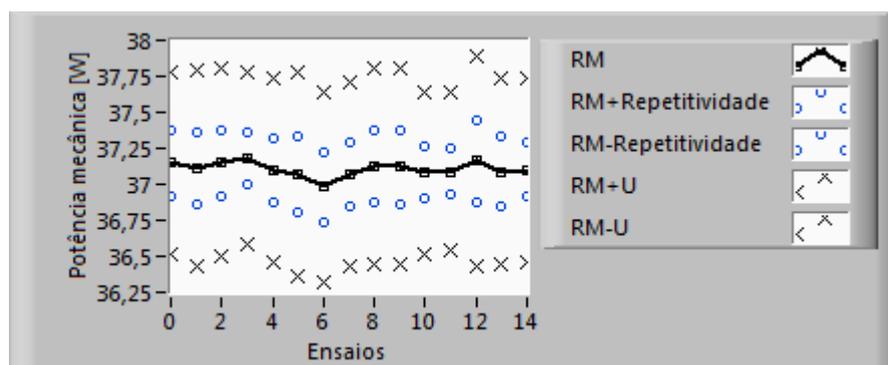


Figura F.51: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=118$ mN.m e $\omega=3000$ rpm

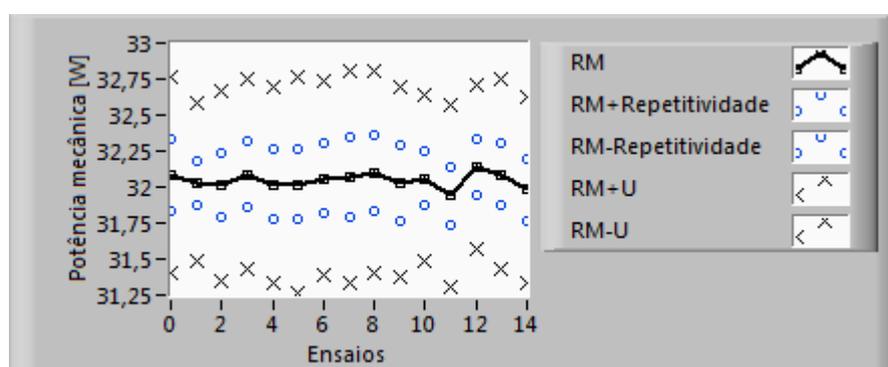


Figura F.52: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=102$ mN.m e $\omega=3000$ rpm

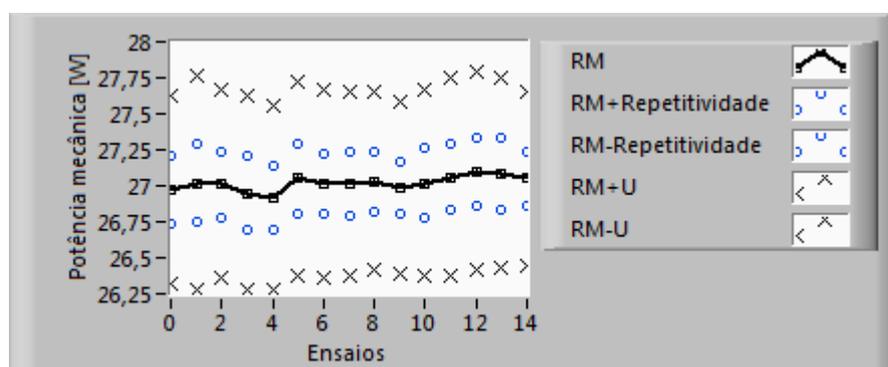


Figura F.53: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=86$ mN.m e $\omega=3000$ rpm

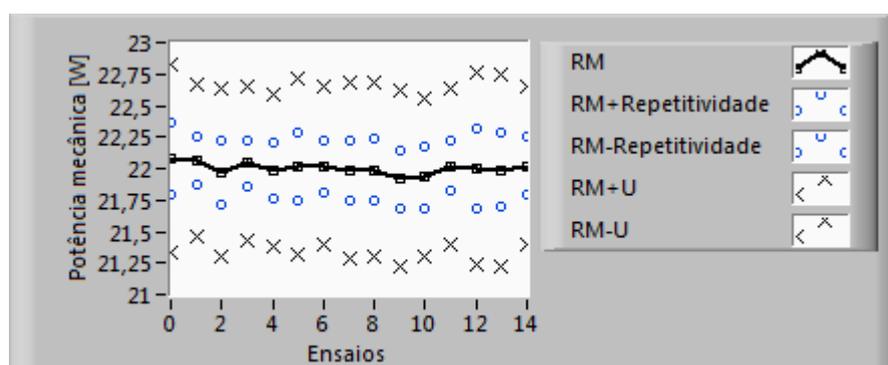


Figura F.54: Reprodutibilidade dos ensaios com o protótipo – $T=70$ mN.m e $\omega=3000$ rpm

ANEXO A – Certificados de calibração

	Laboratório de METROLOGIA DIMENSIONAL REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO	
	Certificado de Calibração	
Data da Calibração: 08/05/09	Data da Emissão: 08/05/09	n. 1605/09
Página: 1 de 2		
1. CONTRATANTE: FUNDAÇÃO CENTROS DE REFERÊNCIA EM TECNOLOGIAS INOVADORAS Campus da UFSC, S/N - Florianópolis - SC	 08/05/09 DATA RUBRICA	
2. SOLICITANTE: O mesmo		
3. COMPARADOR ELETRÔNICO DE DESLOCAMENTO CALIBRADO (SMC):		
3.1. TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO: N° Série (fabricante): 6363 N° Identificação (solicitante): RL 0145 Faixa de Medição: 0 a 30 mm	3.2 DISPOSITIVO MOSTRADOR / UTS N° Série (fabricante): 172040A20797501 N° Identificação (solicitante): RL 0421 Incremento Digital: 0,0001 mm	
4. SÍNTESE DESTA CALIBRAÇÃO: Conforme procedimentos internos, a maior incerteza de medição encontrada, considerando que seja efetuada a respectiva correção, é de 0,0004 mm.	Observações: Condições Ambientais Durante a Calibração: - Temperatura: (20,0 ± 0,3) °C - Umidade Relativa do Ar: (50 ± 10) %ur A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (v_{eff}) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e v_{eff} são apresentados na tabela de resultados.	
5. PADRÃO UTILIZADO (SMP): Máquina de Medir Longitudinal N° Registro (CERTI): RL 0530 U: 0,00018 mm Rastreabilidade: Certificado de Calibração CERTI 0001/09, de 12/01/09, válido até 01/10.		
6. PROCEDIMENTO INTERNO DE CALIBRAÇÃO: PC-124 Foram realizados no mínimo 3 ciclos de medição em pontos distribuídos em toda a faixa de medição do comparador eletrônico de deslocamento, no sentido crescente e decrescente. O comparador foi montado em oposição ao sensor do SMP, cumprindo o princípio de abbé. Os pontos de medição pré-estabelecidos foram referenciados pelo comparador, verificando-se a indicação no SMP.	Documento nº. 33	
<small>Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo Coprecmetro, que avalia a competência do laboratório e comprova sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Coprecmetro é signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros. Este certificado não constitui o instrumento de controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.</small>		
Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI		
Campus da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC	Setor C CEP: 88040-970 Florianópolis - SC Caixa Postal 5053	Tel.: +48 3239 2121 Fax: +48 3239 2119 metrologia@certi.org.br www.certi.org.br
		Fundação CERTI CNPJ 178.626.363/0001-24 Insc. Est. 251.378.241 Insc. Mun. 50.111-5

Figura A.1: Certificado de calibração do transdutor MT30 – página 1



**FUNDAÇÃO
CERTI**

**Laboratório de
METROLOGIA DIMENSIONAL
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**



Calibração
NBR ISO/IEC
17025
CAL 0034

Certificado de Calibração

Data da Calibração: 08/05/09

n. 1605/09

Data da Emissão: 08/05/09

Página: 2 de 2

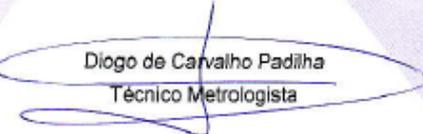
7. RESULTADOS:

TABELA DE RESULTADOS						
INDIC. NO SMC [mm]	MÉDIA DAS INDIC. NO SMP [mm]	CORREÇÃO [mm]	U [mm]	k	V _{eff}	HISTERESE [mm]
0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	2,05	73	*****
0,5000	0,5002	0,0002	0,0003	2,05	75	*****
1,0000	1,0002	0,0002	0,0003	2,13	23	*****
3,0000	3,0004	0,0004	0,0003	2,06	48	*****
5,0000	5,0003	0,0003	0,0003	2,11	29	*****
7,5000	7,5002	0,0002	0,0004	2,28	10	*****
10,0000	10,0002	0,0002	0,0003	2,13	24	*****
15,0000	15,0001	0,0001	0,0004	2,23	12	*****
20,0000	19,9998	-0,0002	0,0003	2,13	20	*****
25,0000	24,9998	-0,0002	0,0004	2,17	16	*****
30,0000	29,9998	-0,0002	0,0003	2,05	54	*****
30,0000	29,9994	-0,0006	0,0004	2,23	12	0,0004
25,0000	24,9992	-0,0008	0,0003	2,06	45	0,0006
20,0000	19,9993	-0,0007	0,0004	2,32	9	0,0005
15,0000	14,9994	-0,0006	0,0003	2,06	41	0,0007
10,0000	9,9992	-0,0008	0,0003	2,20	14	0,0010
7,5000	7,4994	-0,0006	0,0004	2,28	10	0,0008
5,0000	4,9994	-0,0006	0,0003	2,13	20	0,0009
3,0000	2,9994	-0,0006	0,0003	2,13	20	0,0010
1,0000	0,9995	-0,0005	0,0003	2,18	15	0,0007
0,5000	0,4996	-0,0004	0,0004	2,28	10	0,0006
0,0000	-0,0004	-0,0004	0,0003	2,11	29	0,0004

Obs: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação.



Clodoaldo de Campos Marques
Gerente Técnico



Diogo de Carvalho Padilha
Técnico Metrologista

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo Cgcre/Inmetro, que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado relacionam-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo válido a quaisquer fins. Esta calibração não tem o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Setor C
CEP: 88040-970
Florianópolis - SC
Caixa Postal 5053

Tel.: +48 3239 2121
Fax: +48 3239 2119
metrologia@certi.org.br
www.certi.org.br

Fundação CERTI
CNPJ 78.626.363/0001-24
Insc. Est. 251.378.241
Insc. Mun. 50.111-5

Figura A.2: Certificado de calibração do MT30– página 2



LAMEE - Laboratório de Metrologia Elétrica
Laboratório de Calibração Acreditado
pela Cgcre/Inmetro sob o número 140

RELATÓRIO DE MEDIÇÃO PS 119923/07

PROPRIETÁRIO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO ELETROSUL S.A.	PEIDO SERVIÇO 119923/07	NUM. CERTIFICADO PS 119923/07	DATA 21/3/07	FOLHA 2/3
EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO CONTADOR UNIVERSAL	FABRICANTE HP	MODELO/TIPO 5334B	NUM. SÉRIE 2839A03286	NUM. PATRIM. 0772712
REQUERENTE DO SERVIÇO LAMEE				COD. EQ. MEDIÇÃO IT 4000096

1. CARACTERÍSTICAS ADICIONAIS DO OSC - OBJETO SOB CALIBRAÇÃO (OSC):

Função	Valor	Limite de erro
Freqüência	200MHz	-

2. PROCEDIMENTOS USADOS:

Foram avaliados três pontos para cada faixa da grandeza solicitada e efetuadas 03 (três) medições (uma leitura e duas repetições) em cada ponto. Os valores indicados pelo OSC foram comparados com os valores do Sistema de Medição Padrão. A base de tempo foi comparada com a freqüência de 5M Hz do oscilador padrão através da função RATIO A/B do contador IT4000095. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com veff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

3. RASTREABILIDADE:

Os padrões usados na calibração são rastreados aos padrões de referência do Laboratório, que por sua vez foram certificados pelos Padrões Nacionais do INMETRO ou pela RBC (Rede Brasileira de Calibração).

4. CONDIÇÕES AMBIENTAIS:

Temperatura de 23 ± 5 graus Celsius e umidade relativa de 55 ±15%.

5. LISTA DOS PADRÕES DO SMP (SMP - Sistema de Medição Padrão)

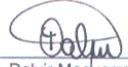
Função do Padrão	Grandeza	Fabric. do Padrão	Modelo do Padrão	N.S. do Padrão	Certificado do Padrão	Validade Certificado
Referência	Tempo	HP	105B	2628A01479	TECPAR C6001502	1/3/2008
Referência	Temperatura e UR	sundo	4463HT	507789	LV4048/06	2/5/2007
Trabalho	Tempo	HP	5334-B	2839A03286	PS449910/05	20/5/2007

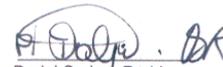
ELETROSUL/DT/DMS/DEMP/ LAMEE
End: Rodovia SC 407 km 4 - Sertão do Maruim - São José - SC - CEP.: 88122-001
Fax.: (48) 3257 0667 Fone: (048) 3231-3656 ou 3657 E-mail: lamee@eletrosul.gov.br

7. ENDEREÇO DO CLIENTE:
ELETROSUL/DT/DMS/DEMP/ LAMEE
End: Rodovia SC 407 km 4 - Sertão do Maruim - São José - SC - CEP.: 88122-001
Fax.: (48) 3257 0667 Fone: (048) 3231-3656 ou 3657 E-mail: lamee@eletrosul.gov.br

8. RESULTADOS:

- Os resultados da calibração encontram-se no certificado folhas 3/3.


 Dalvir Maguerroski
 Responsável pelo Relatório


 Darielez Sedrez Rodrigues
 Executante Supervisionado

Este relatório de medição somente pode ser reproduzido em sua forma íntegra. Reproduções parciais devem ser previamente autorizadas por este laboratório.

Eletrosul Centrais Elétricas S.A.
Laboratório de Metrologia Elétrica
Rod. SC-407, km 04 – Sertão do Maruim – São José/SC – CEP: 88122-001
Fone: (48) 3231-3656 – lamee@eletrosul.gov.br

Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido em sua forma íntegra. Reproduções parciais devem ser previamente autorizadas por este laboratório.

Figura A.3: Certificado de calibração do freqüencímetro HP 5334B – página 1



LAMEE - Laboratório de Metrologia Elétrica
Laboratório de Calibração Acreditado
pela Cgcre/Inmetro sob o número 140

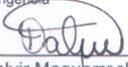
RELATÓRIO DE MEDIÇÃO PS 119923/07

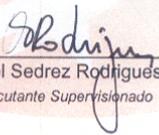
PROPRIETÁRIO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO: ELETROSUL S.A.	PEDIDO SERVIÇO: 119923/07	NUM. CERTIFICADO: PS 119923/07	DATA: 21/3/07	FOLHA: 3/3
EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO: CONTADOR UNIVERSAL	FABRICANTE: HP	MODELO/TIPO: 5334B	NUM. SÉRIE: 2839A03286	NUM. PATRIM.: 0772712
REQUERENTE DO SERVIÇO: LAMEE				COD. EQ. MEDIÇÃO: IT 4000096

8 - RESULTADOS - Medidas de Freqüência

Faixa Nominal (Hz)	Valor Nominal (Hz)	Erro (Hz)	Incerteza da Medição(95%)		Procedimento
			(Hz)	V_{eff} k	
Medidas com Canal "A"					
100000	100000,000	-0,0599	±0,0035	104	2,02 Ver Item 2
1000000	1000000,00	-0,5837	±0,0071	143	2,02 Ver Item 2
10000000	5000000,0	-2,993	±0,030	7	2,43 Ver Item 2
Medidas com Canal "B"					
100000	100000,000	-0,0601	±0,0010	10	2,28 Ver Item 2
1000000	1000000,00	-0,579	±0,041	3	4,53 Ver Item 2
10000000	5000000,0	-2,833	±0,030	7	2,43 Ver Item 2
Base de Tempo					
10M Hz	10000000,0	0,000	±0,032	∞	2,00 Ver Item 2

OSC: Objeto Sob Calibração
SMP: Sistema de Medição Padrão
 v_{eff} : graus de liberdade efetivos
k: fator de abrangência


 Dalvir Maguerroski
 Responsável pelo Relatório


 Darriel Sedrez Rodrigues
 Executante Supervisionado

Este relatório de medição somente pode ser reproduzido em sua forma íntegra. Reproduções parciais devem ser previamente autorizadas por este laboratório.

Eletrosul Centrais Elétricas S.A.
Laboratório de Metrologia Elétrica
Rod. SC-407, km 04 – Sertão do Maruíim – São José/SC – CEP: 88122-001
Fone: (48) 3231-3656 – lamee@eletrosul.com.br

Figura A.4: Certificado de calibração do frequencímetro HP 5334B – página 2