



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

DOUTORADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

RAFAEL SOARES DE OLIVEIRA

FUNDAMENTOS PARA A PADRONIZAÇÃO
METROLÓGICA DA GRANDEZA TORQUE DINÂMICO



SALVADOR
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL (PEI)

**FUNDAMENTOS PARA A PADRONIZAÇÃO
METROLÓGICA DA GRANDEZA TORQUE DINÂMICO**

RAFAEL SOARES DE OLIVEIRA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Industrial.

Orientadores: Prof. Herman Augusto Lepikson
Prof. Ricardo de Araújo Kalid

Salvador - BA
DEZ/2015

O48 Oliveira, Rafael Soares de.
Fundamentos para a padronização metrológica da
grandeza torque dinâmico/ Rafael Soares de Oliveira. –
Salvador, 2015.

238 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson.
Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo de Araújo Kalid.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2015.

1. Torque. 2. Calibração. 3. Metrologia. 4.
Padronização. I. Lepikson, Herman Augusto. II. Kalid,
Ricardo de Araújo. III. Universidade Federal da Bahia. IV.
Título.

CDD: 621.3

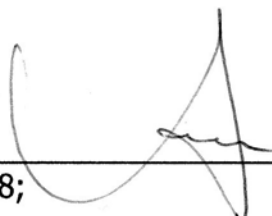
**FUNDAMENTOS PARA A PADRONIZAÇÃO METROLÓGICA DA GRANDEZA
TORQUE DINÂMICO**

RAFAEL SOARES DE OLIVEIRA

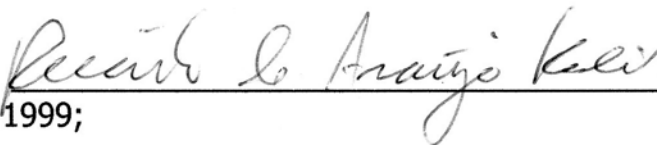
Tese submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Industrial.

Examinada por:

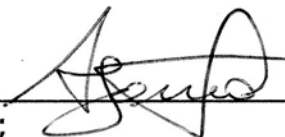
Prof. Herman Augusto Lepikson
Doutor em Engenharia Mecânica, Brasil, 1998;



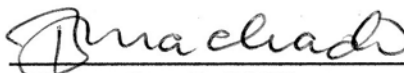
Prof. Ricardo de Araujo Kalid
Doutor em Engenharia Química, Brasil, 1999;



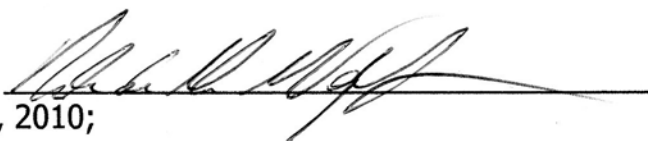
Prof. Antonio Lopes Gama
Doutor em Engenharia Mecânica, Brasil, 1998;




Prof. Renato Reis Machado
Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Brasil, 2005;



Prof. Robson da Silva Magalhães
Doutor em Engenharia Industrial, Brasil, 2010;



Prof. Silvio Alexandre Beisl Vieira de Melo
Doutor em Engenharia Química, Brasil, 1997;



Salvador, BA - BRASIL
dezembro/2015

Conforme resolução do Programa, o conjunto de orientadores teve a representação de 1 (um) único voto no parecer final da banca examinadora.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha companheira de toda a jornada Nathalye e ao meu filho Lude, que no meio dessa "confusão" nos trouxe alegria e ainda mais vontade de seguir o caminho, a minha família e aos amigos.

AGRADECIMENTO

Agradeço imensamente aos meus orientadores professores Herman Lepikson, um verdadeiro amigo durante todo o período, e Ricardo Kalid, sempre preciso em suas interseções, pelo compartilhamento de seus conhecimentos e pelas constantes calibrações e correções dos rumos da pesquisa. Agradeço por me ajudarem a transformar as ideias em ferramentas para superar os desafios.

Agradeço ao INMETRO pelo apoio institucional e principalmente os amigos do LAFOR, por compartilharem desse sonho desde as suas primeiras linhas, que já se desenhavam há bastante tempo, e em especial ao Paulo Couto pela valorosa ajuda no desenvolvimento dos estudos de incerteza.

Agradeço aos amigos do CEPEL/Adrianópolis, Wagner Duboc e Marcos Gomes, pela viabilização dos experimentos, o que com certeza garantiu a realização do trabalho.

Agradeço a CAPES pelo apoio estratégico e financeiro no projeto BRAGECRIM de cooperação internacional com a TU-Ilmenau, onde os colegas envolvidos auxiliaram na pesquisa sob os mais diversos aspectos. Agradeço a Deus pelo ambiente de paz que sempre me proporcionou e por ter colocado em meu caminho pessoas, até então a mim desconhecidas, que de diversas maneiras me fizeram crer que, mesmo "longe de casa", é possível receber carinho, atenção, ajuda e bater excelentes papos.

"Quando foi a última vez,
que você fez alguma coisa pela primeira vez ?"

Van Halen, The Trouble with Never

" A magia de uma vida é uma medida de amor e respeito
Tão difícil de ganhar, por isso, facilmente queimada
Na plenitude do tempo
Um jardim para nutrir e proteger"

Rush, The Garden

"A paranoia é a consciência aguda da fragilidade da vida"

(aprendizado)

Luiz Felipe Pondé

RESUMO

Atualmente inexistem a rastreabilidade dinâmica para a grandeza torque, de forma que atenda as demandas de calibração dos transdutores, que são utilizados sob regimes de medição com características diferentes daquelas reproduzidas pelos procedimentos e sistemas de calibração estáticos tradicionais. Os regimes dinâmicos de medição estão presentes em inúmeras aplicações dos sensores de torque em diversos campos da indústria, mas suas características não são bem avaliadas pelos padrões atuais.

A tese apresenta os fundamentos para a proposta de um novo método de calibração com a realização do torque de referência a partir do princípio físico da geração do torque inercial pela aplicação de uma aceleração angular a um corpo com momento de inércia de massa conhecido. Uma metodologia foi desenvolvida de forma a consolidar este princípio físico com um regime de medição aplicável ao transdutor através de curvas de acionamento e com características dinâmicas e transientes de variação do mensurando.

Na pesquisa, são apresentadas as sequências de medições necessárias para extrair do conjunto os valores comparáveis de torque e dois métodos principais de avaliação do sensor são determinados. O método da comparação direta, mais completo, avalia o transdutor ponto a ponto na curva de acionamento, comparando o erro de medição entre os valores de torque medido e torque de referência. O método da comparação indireta, mais simples, apresenta uma maneira de verificação da relação entre o torque medido e a aceleração medida, através da determinação de uma curva de ajuste linear, compara os valores de momentos de inércia de massa de referência aos valores dos coeficientes angulares dessas retas.

Bancadas experimentais são projetadas para reproduzir o princípio físico e gerar dados de medição, que são processados e interpretados conforme os dois métodos distintos de comparação. São realizadas abordagens práticas e teóricas para a avaliação das componentes que venham compor o resultado da calibração.

Palavras-chave: torque dinâmico, metrologia de torque, calibração dinâmica, rastreabilidade, padronização, metrologia.

ABSTRACT

Currently, there is no dynamic traceability for the quantity torque in order to meet the demands of the calibration transducers that are used in measurement arrangements with different characteristics than those reproduced by the traditional procedures and systems based on static principles. The dynamic and transient measuring regimes are present in numerous applications of torque sensors in various fields of industry, but their features are not well evaluated by today's standards.

The thesis presents the fundamentals for the proposal of a new calibration method with the completion of the reference torque based on the physical principle of generating the inertial torque by applying an angular acceleration to a body of known mass moment of inertia. A methodology was developed to consolidate this physical principle with a measurement system applicable to the transducer through drive curves and with dynamic and transient characteristics of the quantity variation.

In the research, there are presented the sequences of measurements necessary to extract all the comparable values of torque and two main methods of evaluation of the sensor are determined. The method of direct comparison, fuller, evaluates the transducer point to point in the drive curve, comparing the measurement error between the measured torque and the reference torque values. The method of indirect comparison, the simplest, shows a way to check the relationship between the measured torque and the measured acceleration by the determination of a linear fitting curve, allowing to compare the reference mass moments of inertia values to the angular coefficients of these lines.

Experimental benches are designed to reproduce the physical principle and generate measurement data, which is processed and interpreted according to the two different comparison methods. There are carried out theoretical and practical approaches for the evaluation of the components which will compose de calibration result..

Keywords: dynamic torque, torque metrology, dynamic calibration, traceability, standardization, metrology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplos de transdutores de torque e aplicações que utilizam essa medição ^{1; 2; 3}	27
Figura 1.2 - Diagrama representativo da metodologia utilizada na pesquisa.	35
Figura 2.1 - Extensômetro utilizado na medição de efeitos torcionais e ponte extensométrica aplicada a transdutores de torque ^{47; 48}	44
Figura 2.2 - Atual pirâmide de rastreabilidade da grandeza torque.....	45
Figura 2.3 - Figura com princípio do peso morto para a realização do torque em um padrão primário.	46
Figura 2.4 - Esquema com o Princípio do método de comparação.....	48
Figura 2.5 - Séries de carregamento para a classe 0.1 ⁶¹	52
Figura 2.6 - Gráficos característicos de um transdutor de torque: (a) curva de não linearidade; (b) parâmetros de zero e histerese ⁴⁶	54
Figura 2.7 - Gráfico de <i>creep</i> de descarregamento para diferentes padrões de transferência utilizados em uma comparação interlaboratorial ⁵¹	55
Figura 2.8 - Exemplo de identificação dos pontos utilizados nas séries de medição para cálculo de alguns os parâmetros da calibração.	55
Figura 2.9 - Curva de medição real de um transdutor sendo calibrado no Sistema Padrão Primário de Torque do Inmetro pelo método "puramente estático" ⁶⁸	59
Figura 2.10 - Diferentes comportamentos de histerese nas subfaixas de um transdutor de 1000 N·m testado no método contínuo ⁷⁰	61
Figura 2.11 - Perfil dos carregamentos simplificados utilizados para testes de <i>creep</i> e histerese de um transdutor para servir de referência no método contínuo ⁷¹	61
Figura 2.12 - Curvas de calibração para carregamento e descarregamento (a) nos métodos de aplicação direta e contínuo com 31 s e (b) nos métodos de aplicação direta e contínuo com 6 s ⁷¹	62
Figura 2.13 - Comparação entre os métodos puramente estático e contínuo para (a) desvio de sensibilidade e (b) desvio de histerese do transdutor ⁷¹	62
Figura 2.14 - Método puramente estático para diferentes filtros digitais ⁶⁰	63
Figura 2.15 - Método contínuo para diferentes filtros digitais e diferentes taxas de aplicação do torque ⁶⁰	63
Figura 2.16 - Sistema tradicional de medição do torque em bancadas dinamométricas ³⁴	65

Figura 2.17 - Métodos propostos para a calibração de bancos de testes de motores <i>in loco</i> ⁷³	66
Figura 2.18 - Sistema proposto por ⁷⁶ para a verificação da resposta do transdutor à transferência de momento angular.	68
Figura 2.19 - Método proposto por ⁷⁷ para a calibração de transdutores de torque pelo método senoidal.....	69
Figura 3.1 - Rastreabilidade do torque, incluindo a pirâmide proposta para a padronização dinâmica.	73
Figura 3.2 - Curva característica do torque de referência a ser gerada.....	77
Figura 3.3 - Curva característica das taxas de torque (pico para a máxima taxa crescente e vale para a máxima taxa decrescente).....	78
Figura 3.4 - Diagrama básico da realização do princípio.	81
Figura 3.5 - (a) Trecho da senóide semelhante ao perfil de torque desejado; (b) Curva de aceleração proporcional ao torque e rampa de velocidade angular obtida da integração.	82
Figura 3.6 - Esboço do sistema de calibração com os componentes elementares propostos para realização do princípio físico de referência.	83
Figura 3.7 - Equilíbrio no eixo de transmissão e medição do torque (τ_{inr} = torques inerciais; τ_{car} = torques de carga).....	84
Figura 3.8 - Metodologia de medição para obtenção do torque medido líquido (T_{tl}). 86	
Figura 3.9 - Fluxograma com a sequência de operação do sistema de calibração variando parâmetros de acionamento	87
Figura 3.10 - (a) Sequência de acionamentos em diferentes intervalos de velocidades; (b) Valores de torque para uma mesma configuração de acionamento, mesmo perfil de aceleração ajustadas para uma mesma base de tempo (sincronização).....	89
Figura 3.11 - Rampas de acionamento sob uma mesma configuração e indexação no tempo total do conjunto de séries.	91
Figura 3.12 - Seleção das curvas de torque dos acionamentos e indexação vertical comum às curvas.....	91
Figura 3.13 - Curvas de torque e uma mesma zona de torque identificada.	92
Figura 3.14 - Zonas de torque em uma curva de medição teórica.....	94
Figura 4.1 - Esquema da Bancada #1.	100
Figura 4.2 - Curvas de aceleração e velocidade dos acionamentos rejeitados, parametrizados no intervalo ($261,6 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$; $313,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) para os tempos (a) $t_a = 0,6 \text{ s}$; (b) $t_a = 0,5 \text{ s}$. Em (c), curva de velocidade na tentativa de acionamento no tempo $t_a = 0,4 \text{ s}$	104

Figura 4.3 - Curvas de aceleração e velocidade nos acionamentos: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5, (f) Ac#6.	106
Figura 4.4 - Exemplo de regiões (acionamento Ac#2): (a) Rampa de velocidade com overshoot e trecho destacado a ser considerado para o regime transiente e (b) Curva de aceleração para exemplificar as regiões de transiente e de oscilação (estabilização do controle).	107
Figura 4.5 - Rampas de velocidade nas configurações de acionamento: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5 e (f) Ac#6.	109
Figura 4.6 - Curvas de aceleração e velocidade medidas no Ac#2 com identificação do tempo de aceleração teórico ajustado no inversor de frequência ($t_a = 1,0$ s).	111
Figura 4.7 - Curvas de médias das acelerações e desvios padrões relativos para as configurações de acionamentos: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5, (f) Ac#6.	113
Figura 4.8 – Curva de taxa de variação da aceleração para os acionamentos (a) Ac#1 e (b) Ac#2.	114
Figura 4.9 – Aplicação de filtro digital DC (FFT Bessel, passa baixa de frequência de corte igual a zero) no trecho que antecede a curva de torque gerada no acionamento Ac#2 para obtenção do valor inicial do torque medido T_{tz}	119
Figura 4.10 - Curvas de média dos torques medidos e desvios padrões relativos para as configurações de acionamento: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5, (f) Ac#6.	121
Figura 4.11 - Trechos dos acionamentos com as curvas de torque medido (T_{tl}) e torque de referência (T_{ir}) para os acionamentos (a) Ac#1 e (b) Ac#2..	122
Figura 4.12 –Valores médios de torque para T_{tl} e T_{ir} e os erros de medição (E) em cada acionamento: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5, (f) Ac#6.	124
Figura 4.13 – (a) Relação linear entre α e T_{tl} e (b) desvio relativo de linearidade nos acionamentos Ac#1 e Ac#2.	127
Figura 4.14 – Vista representativa dos elementos da bancada #2, parcialmente explodida entre as partes conectáveis.	131
Figura 4.15 – (a) Vista frontal do disco de inércia; (b) Vista em corte mostrando as dimensões de espessura; (c) Vista da montagem com o acoplamento hidráulico e o eixo de transmissão.	134
Figura 4.16 – Discos fabricados.	134
Figura 4.17 – Montagens com as configurações: (a) sem disco; (b) disco D20; (c) disco D40.	135

Figura 4.18 – Acionamentos com t_a de 3,0 s, intervalo de velocidade entre 104,72 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e 157,08 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e diferentes configurações de carga: (a) sem discos, somente o eixo; (b) disco D20; (c) disco D40.	137
Figura 4.19 – Intervalo de velocidade entre 104,72 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e 157,08 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) acionamentos da configuração sem disco e com variação de t_a ; (b) sincronização entre as curvas de configurações de carga e t_a diferentes.	139
Figura 4.20 – Curvas de torque medido e momento de inércia calculado para o acionamento com o transdutor desacoplado do eixo de transmissão.	139
Figura 4.21 – (a) Curvas de torque medido T_t , com as indicações dos torques líquidos e (b) taxas de torque calculadas dos valores de torque medidos.	141
Figura 4.22 – Curvas sincronizadas normalizadas de torque medido e aceleração.	142
Figura 4.23 – Curvas de torque medido, torque de referência e erro de medição para: (a) disco de inércia D20 e (b) disco de inércia D40.	143
Figura 4.24 – Curvas de aceleração <i>versus</i> torque para (a) configuração de inércia sem disco; (b) com disco D20 e (c) com disco D40.	144
Figura 4.25 – Curvas lineares ajustadas de aceleração <i>versus</i> torque para as configurações indicadas.	144
Figura 4.26 – Desvios de linearidade para as curvas ajustadas em (a) D20 e (b) D40.	146
Figura 4.27 – (a) Eixo projetado em CAD e (b) tela de ajuste das características de acionamento do software de simulação.	149
Figura 4.28 – (a) Rampas de aceleração no perfil de velocidade e (b) respostas em torque distribuídas ao longo do tempo da simulação.	150
Figura 4.29 – Comparações entre as rampas 1 e 2 das simulações no degrau #1 para as situações de centralização do disco: (a, c, e) Rampa 1 e (b, d, f) Rampa 2.	152
Figura 4.30 – Rampa 1 para os degraus #1 e #2 nas taxas de aquisição: (a) 300 Hz, (b) 100 Hz, (c) 50 Hz.	153
Figura 4.31 – Patamares de velocidade: (a) v_{ini} do degrau #1; (b) v_{fin} do degrau #1; (c) v_{ini} do degrau #2; (d) v_{fin} do degrau #2.	154
Figura 4.32 – Dados de torque obtidos de dois acionamentos com filtro <i>online</i> de 50 Hz e sem filtro <i>online</i> . Ambos filtrados <i>off-line</i> em 5 Hz.	157
Figura 4.33 – (a) Curvas de torque e velocidade originais; (b) Curvas de torque com aplicação de diferentes filtros.	158

Figura 4.34 – Curvas originais e com filtro passa baixa de 20 Hz para: (a) os dados de torque e (b) os dados de velocidade.	159
Figura 4.35 – Patamares de velocidade: (a) v_{ini} do degrau #1; (b) v_{fin} do degrau #1; (c) v_{ini} do degrau #2; (d) v_{fin} do degrau #2.	160
Figura 4.36 – Curvas normalizadas de torque e aceleração para comparação entre os métodos de derivação.	161
Figura 4.37 – (a) Sequências para derivação do sinal de velocidade; (b) Curvas de aceleração calculadas a partir de dados originais de velocidade sem filtro; (c) Curvas de aceleração calculadas a partir de dados originais de velocidade com filtro <i>online</i> de 50 Hz.	162
Figura 4.38 – Diagrama causa efeito para as principais fontes de contribuição na estimativa da incerteza de medição do mensurando E	167
Figura 4.39 – Gráfico da função autocorrelação para os dados do patamar de tara anterior a primeira curva de carregamento do eixo sem disco, com nível de significância de 95%.	170
Figura 4.40 – Disco inercial D20 sendo calibrado na MMC do LAMED.	182
Figura 4.41 – (a) Curva de torque de referência e sua incerteza expandida; (b) curva de torque medido e sua incerteza de medição expandida.	185
Figura 4.42 – Curva representativa do torque e as curvas de erro de medição envelopado pelas curvas de limite inferior e superior do intervalo de confiança calculado a partir da incerteza expandida de de medição do erro.	185
Figura 4.43 – Gráfico com as contribuições parciais de incerteza em toda curva ..	186
Figura 4.44 – Gráfico com as contribuições parciais de incerteza por regiões: (a) Região de maior taxa de variação positiva do torque; (b) Região de maior taxa de variação negativa do torque e (c) Região de pico de torque.	187
Figura 4.45 – Gráfico com as contribuições parciais de incerteza para o momento de inércia de referência.	187
Figura 4.46 – Diagrama causa efeito para as principais fontes de contribuição na estimativa da incerteza de medição do mensurando θS_{DXX}	190
Figura 4.47 – Diagrama de (a) erro e (b) incerteza para os diferentes torques de corte aplicados nas massas de dados de SD e D20 para cálculos das curvas de ajuste.	193
Figura B.1 - Bancada #1: (a) montagem original para ensaio de motor; (b) detalhe do transdutor de torque na montagem original; (c) adaptação para teste de acionamentos com transdutor desacoplado do freio dinamométrico e	

adaptado para trabalhar em balanço; (d) detalhe do sistema de leitura ótica do disco com ranhuras do encoder. 200

Figura B.2 - Curva característica de velocidade versus torque de um motor elétrico de indução ¹⁰²	203
Figura B.3 - Rampas de aceleração e desaceleração conduzidas por um inversor de frequência ⁸⁸	204
Figura B.4 - Princípio de funcionamento do encoder acoplado ao transdutor de torque utilizado na bancada #1 ⁴⁶	206
Figura B.5 - Sistemas DAQ utilizados nas bancadas: (a) MGC-PLUS; (b) Quantum.	206
Figura B.6 - (a) Princípio de funcionamento do acoplamento hidráulico; (b) Foto de catálogo do componente; (c) Dimensões do modelo ETP-TECHNO-30 selecionado para a montagem da bancada #2 ¹⁰⁴	208
Figura B.7 - Forças distribuídas no eixo.	210
Figura C.1 - Identificação do atraso entre os sinais de torque e aceleração.	212
Figura C.2 - Modelo simplificado da bancada #2 para estimativa da frequência natural da montagem.....	214
Figura C.3 - Teste de varredura de velocidade.....	216
Figura C.4 - Gráficos de amplitude das análises de FFT dos sinais de velocidade nos testes de varredura nas bancadas de 100 N·m (bancada #2) e 200 N·m (bancada adicional).	217
Figura C.5 - Medição do torque de atrito nos mancais. Acionamento de 0 rad·s ⁻¹ até 52,36 rad·s ⁻¹	218
Figura C.6 - (a) Curva de torque originada do acionamento do eixo sem discos no intervalo de velocidade entre 104,72 rad·s ⁻¹ e 157,08 rad·s ⁻¹ ; (b) Diferença entre os valores de torque nos patamares anterior e posterior ao acionamento.	218
Figura F.1 - Medição do torque de atrito nos mancais. Acionamento de 0 rad·s ⁻¹ até 52,36 rad·s ⁻¹	218
Figura F.2 - Medição do torque de atrito nos mancais. Acionamento de 0 rad·s ⁻¹ até 52,36 rad·s ⁻¹	218
Figura G.1 - Sistema Sugerido para as Bancadas em Estudos Futuros.....	226

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Exemplos de aplicações de transdutores de torque.....	40
Tabela 2.2 - Caracterização dos regimes de medição do torque em algumas aplicações	41
Tabela 2.3 - Parâmetros de classificação dos instrumentos de medição de torque ⁵⁵	55
Tabela 4.1 - Relação entre o que está sendo avaliado na proposta e o método usado para a avaliação.	97
Tabela 4.2 - Parâmetros do conjunto acionador da bancada #1 para determinação do tempo de aceleração mínimo (t_{a_min}).....	103
Tabela 4.3 - Parâmetros dos acionamentos aplicados.....	106
Tabela 4.4 - Médias dos picos de aceleração.	110
Tabela 4.5 - Comparação entre a aceleração teórica e as acelerações médias experimentais dos acionamentos Ac#1, Ac#2 e Ac#3.....	112
Tabela 4.6 - Médias dos picos de aceleração, desvio padrão da média dos picos de aceleração, picos das taxas de variação da aceleração e correspondentes média e desvio padrão da média dos valores de aceleração em cada acionamento.....	115
Tabela 4.7 - Valores de máximo torque e máxima potência mecânica gerada no eixo.	116
Tabela 4.8 - Médias dos picos de torque e desvios padrões das médias dos picos de torque em cada acionamento.	120
Tabela 4.9 - Erro de medição das médias dos sinais de torque.....	125
Tabela 4.10 - Parâmetros do ponto de 1,5 N·m.	125
Tabela 4.11 - Parâmetros do ponto de 1,7 N·m.	126
Tabela 4.12 - Relação de aceleração e momentos de inércia de massa dos discos de referência.	132
Tabela 4.13 - Dimensões básicas dos discos e os valores calculados de massa e momento de inércia de massa.	134
Tabela 4.14 - Valores calculados de θS em comparação aos valores de referência θ_{ref}	145
Tabela 4.15 - Picos de torque calculados para as configurações de centralização do disco de inércia em relação ao eixo. Taxa de amostragem de 300 Hz.	151

Tabela 4.16 - Valores de incerteza típicos para transdutores de torque calibrados estaticamente (1).....	168
Tabela 4.17 - Grandezas de entrada iniciais.	184
Tabela 4.18 - Valores de incerteza calculados para diferentes configurações de inércia DXX e diferentes pontos de corte para seleção de dados para a reta de ajuste (valores em kg·m ² exceto onde indicado).	192
Tabela B.1 - Principais especificações técnicas do acoplamento hidráulico ETP- TECHNO-30 ¹⁰⁴	208
Tabela B.2 - Dimensões básicas dos discos e os valores calculados de massa e momento de inércia de massa.....	211
Tabela C.1 - Valores estimados para o primeiro modo de vibração torcional no modelo simplificado da bancada. (coluna em cinza) parâmetros da bancada #2; (demais colunas) demonstração com a variação do modelo do transdutor em calibração	215
Tabela D.1 - Ponto com maior taxa positiva para o acionamento com D20	220
Tabela D.2 - Ponto de torque de pico com D20.....	220
Tabela D.3 - Ponto com maior taxa negativa para o acionamento com D20.....	221
Tabela F.1 - INMs com padrões primários de torque ⁹	224

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

T_i	Torque inercial
θ	Momento de inércia de massa
α	Aceleração angular
T_{ir}	Torque inercial de referência
θ_r	Momento de inércia de massa de referência
α_r	Aceleração angular de referência
T_t	Leitura de torque do transdutor (torque medido)
T_{tl}	Torque medido líquido
v	Velocidade angular nominal
t_a	Tempo de aceleração
τ	Esforços torcionais
θ_t	Momento de inércia de massa total no eixo de medição
θ_i	Momento de inércia de massa inicial no eixo de medição
T_{ti}	Torque medido inicial
T_{ii}	Torque inercial inicial
E	Erro de medição entre valores de torque
θ_c	Momento de inércia de massa calculado
θ_s	Momento de inércia de massa do coeficiente angular
t_{a_min}	Tempo de aceleração mínimo do motor
θ_{mot}	Momento de inércia de massa do motor
T_{nom_mot}	Torque nominal do motor
T_{carga}	Torque da carga
ω	Velocidade angular medida
Δt	Período de amostragem
θ_{tra}	Momento de inércia de massa do transdutor
j	Índice para as curvas sincronizadas
i	Índice temporal
n	Índice para identificação das curvas de acionamento
N	Número total de curvas de acionamento
$\bar{\alpha}$	Aceleração angular média
T_{tot}	Torque total transmitido no eixo
P	Potência mecânica transmitida no eixo

T_{tz}	Torque de tara
T_{tb}	Torque bruto
D_i	Diâmetro interno do disco inercial
D_e	Diâmetro externo do disco inercial
M_d	Massa do disco inercial
$\theta_{r(DXX)}$	Momento de inércia de massa do disco inercial DXX
T_{aju}	Torque calculado da curva de ajuste linear
$a_{SD} ; a_{DXX}$	Coefficientes angulares das curvas de ajuste linear
$u_{RT} ; u_{RTi}$	Incerteza padrão para as dispersões dos valores de T_{tb}
$N_{tb}; N_{tbi}$	Número de curvas de acionamento para o torque bruto
N_z	Número de pontos avaliados no patamar de tara
N_{pc}	Último ponto com ACF fora dos limites de significância
u_{CerT}	Incerteza padrão do certificado de calibração estática do transdutor
$u_{c,tl}$	Incerteza padrão combinada para o torque líquido
Ci	Coefficiente de sensibilidade
u_{TXX}	Componente de incerteza do torque medido no transdutor
v_{eff}	Graus de liberdade efetivos
k	Fator de abrangência
u_{ω}	Incerteza padrão da velocidade angular medida
u_{β}	Incerteza padrão do deslocamento angular calculado
Res_{Enc}	Resolução do encoder
$u_{\Delta\omega}$	Incerteza padrão da variação da velocidade
$u_{\Delta t}$	Incerteza padrão do período de amostragem
u_{α}	Incerteza padrão da aceleração angular medida
$u_{R\bar{\alpha}}$	Incerteza padrão dos desvios da aceleração média
$u_{c\bar{\alpha}}$	Incerteza padrão combinada da aceleração média
u_{M_d}	Incerteza padrão da massa do disco inercial
$u_{D_e} ; u_{D_i}$	Incerteza padrão dos diâmetros do disco
$u_{c_{\theta r}}$	Incerteza padrão do momento de inércia de massa de referência
u_{c_E}	Incerteza padrão combinada do erro de medição entre valores de torque
n_{tc}	Índice para dados de torque selecionados acima do valor de torque de corte, para curva de ajuste linear
u_a	Incerteza padrão do coeficiente angular calculado da reta de ajuste
E_{θ}	Erro de medição entre valores de momento de inércia de massa
$u_{E\theta}$	Incerteza padrão do erro entre valores de momento de inércia de massa

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACF	Função de Autocorrelação
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIPM	Bureau International de Poids et Mesures
BRAGECRIM	Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CENAM	Centro Nacional de Metrologia
CEPEL	Centro de Pesquisa em Energia Elétrica
CTAI	Centro de Treinamento em Tecnologia Industrial e Automação
DAQ	Sistema de Aquisição de Dados
DEBRATOR	Fundamentos científicos para a realização e medição de pequenos torques (projeto)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DINTOR	Fundamentals for the Realization and Measurement of Dynamic Torque (projeto CAPES)
EMRP	European Metrology Research Programme
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
FFT	Fast Fourier Transform
GUM	Guia para Expressão da Incerteza de Medição
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
IMEKO	Confederação Internacional de Metrologia
INM	Institutos Nacionais de Metrologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	International Standardization Organization
JRP	Joint Research Projects from EURAMET
LAFOR	Laboratório de Força do INMETRO
LAMED	Laboratório de Metrologia Dimensional do INMETRO
LNE	Laboratoire National de Métrologie et D'essais
MCM	melhores capacidades de medição
MMC	Método de Monte Carlo
NBR	Norma Brasileira
NMIJ	National Metrology Institute of Japan

NPL	National Physical Laboratory
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RBC	Rede Brasileira de Calibração
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIM	Sistema Interamericano de Metrologia
TC3	Comitê Técnico de Massa e Grandezas Correlatas da IMEKO
TDMMQ	Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities
TU-ILMENAU	Technischen Universität Ilmenau
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UKAS	United Kingdom Accreditation Service

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	27
1.1 Motivação.....	29
1.2 Objetivo principal.....	33
1.3 Objetivos específicos	33
1.4 Metodologia da pesquisa.....	34
1.5 Impactos tecnológicos e científicos.....	36
1.6 Organização do trabalho	37
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO DA PROPOSTA	39
2.1 Regimes de Medição das Aplicações.....	40
2.2 Os Transdutores de Torque	43
2.3 Rastreabilidade na Calibração do Torque	45
2.4 Calibração de Transdutores de Torque	49
2.4.1 Escopo e Procedimento de Calibração	49
2.4.2 Os padrões de referência	50
2.4.3 Carregamentos.....	51
2.4.4 Parâmetros obtidos da calibração	52
2.5 Novas abordagens à rastreabilidade metrológica da grandeza torque	56
2.5.1 Calibração pelo Método Contínuo	58
2.5.2 Avaliação do torque de transmissão em bancos de teste de motores	64
2.5.3 Primeiras propostas para a rastreabilidade dinâmica.....	67
2.5.4 Oportunidades para Pesquisa	70
CAPÍTULO 3 - PRINCÍPIO DA CALIBRAÇÃO DINÂMICA.....	73
3.1 O escopo da calibração dinâmica	75
3.2 O princípio físico de referência.....	80
3.3 Proposta de seqüências para as medições.....	86
3.4 Considerações finais do capítulo.....	95
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO E RESULTADOS.....	96
4.1 A bancada experimental #1	99
4.1.1 Testes de acionamento	102

4.1.2 Avaliação das curvas de aceleração.....	109
4.1.3 Os valores de torque nos acionamentos.....	117
4.1.4 O torque medido e o torque de referência (comparação direta)	120
4.1.5 O torque medido e a aceleração medida (comparação indireta)	127
4.1.6 Considerações sobre os resultados parciais	128
4.2 A Bancada experimental #2.....	130
4.2.1 Componentes estruturais.....	131
4.2.2 Pré-testes para os acionamentos	135
4.2.3 Testes para a metodologia de calibração	136
4.2.3.1 Avaliação da repetibilidade nas configurações de inércia.....	137
4.2.3.2 Semelhança entre curvas de aceleração.....	138
4.2.3.3 Verificação do princípio físico	139
4.2.3.4 Testes para a sequência de calibração	140
4.2.4 Considerações sobre os resultados parciais	146
4.3 Considerações sobre o processamento de dados.....	147
4.3.1 Taxa de aquisição.....	148
4.3.2 Estudos da aplicação de filtros	156
4.3.3 Estudos sobre a sequência de processamento (derivação)	160
4.4 Incerteza de Medição.....	163
4.4.1 Modelo do mensurando para comparação direta	165
4.4.1.1 Contribuições referentes ao certificado de calibração do transdutor	167
4.4.1.2 Contribuições referentes à repetibilidade entre curvas	168
4.4.1.3 Contribuições referentes à variação nos patamares de tara.....	169
4.4.1.4 Incerteza padrão combinada para torque medido	171
4.4.1.5 Contribuições referentes à incerteza de medição da aceleração.....	173
4.4.1.6 Incerteza de medição para o momento de inércia de massa.....	180
4.4.1.7 Incerteza de medição combinada do erro de medição	183
4.4.1.8 Exemplo para dados experimentais.....	183
4.4.1.9 Comparação Método de Monte Carlo (MMC)	188
4.4.2 Método da comparação indireta (curva de ajuste linear)	189
4.4.2.1 Exemplo numérico	192
4.4.3 Considerações sobre a incerteza de medição	193
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	195

5.1 Destaques para os achados principais.....	195
5.2 Destaques para a metodologia de medição	196
5.3 Destaques para os componentes	198
5.4 Trabalhos futuros	200
Referências	202
APÊNDICE A Artigos Publicados.....	211
APÊNDICE B Descrição dos Equipamentos das Bancadas	213
APÊNDICE C Pré-testes da Montagem.....	227
APÊNDICE D Informações Complementares para a Incerteza de Medição.....	235
APÊNDICE E Fluxograma para a Sequência de Execução da Calibração	237
APÊNDICE F Informações Complementares sobre os Padrões estáticos	238
APÊNDICE G Setup Sugerido para Bancadas em Estudos Futuros.....	241

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nas mais diversas aplicações industriais que utilizam máquinas ou sistemas mecânicos, o conhecimento e a avaliação do esforço torcional sofrido por um determinado elemento mecânico ou um conjunto de componentes são fundamentais para o seu dimensionamento e a sua correta utilização. Para a determinação ou medição desses esforços, são amplamente utilizados os transdutores de torque. A Figura 1.1 mostra alguns modelos de transdutores de torque e algumas aplicações.

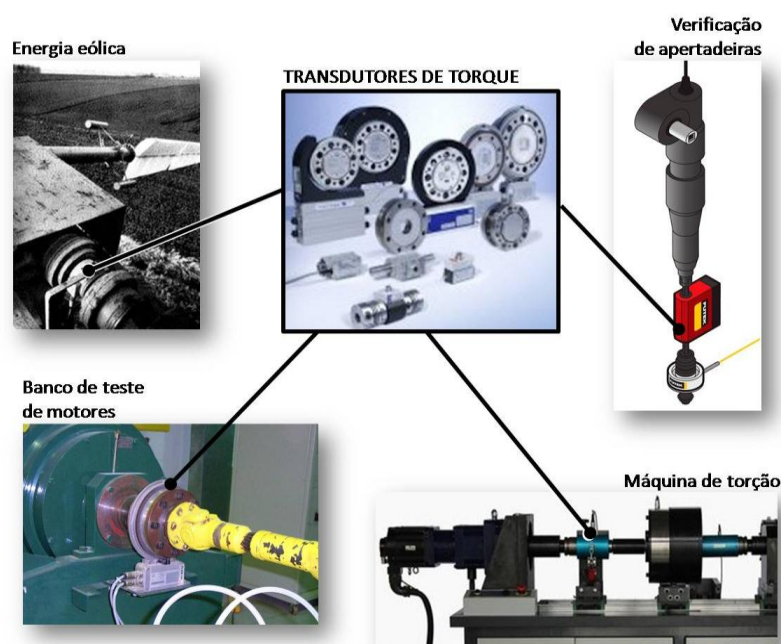


Figura 1.1 - Exemplos de transdutores de torque e aplicações que utilizam essa medição^{1; 2; 3}.

A medição de torque é fundamental em várias aplicações, dentre elas, pode-se destacar: os testes e o acompanhamento de desempenho de motores e transmissão, de turbinas, de bombas hidráulicas, de trens de engrenagens, além da medição de energia dentro de sistemas de propulsão e do aperto controlado

exercido por apertadeiras pneumáticas e elétricas. O monitoramento do torque pode ser capital para o desempenho desses componentes, evitando o desgaste de sistemas de acionamento e aumentando a qualidade dos produtos.

Os valores de torque a serem aplicados ou medidos são bem definidos em projeto, o que inclui seus limites de tolerância ou as incertezas de medição do processo. A qualidade e a capacidade de um instrumento de medição são quantificadas a partir dos resultados de sua calibração, os quais permitem uma avaliação, prévia à utilização, da condição do instrumento em atender ou não aos requisitos do projeto.

Quando o instrumento de torque é calibrado corretamente, ele tem alta confiabilidade metrológica^[1] e permite uma avaliação segura de sua aplicação. Quando não, o atendimento aos requisitos do projeto se torna insuficiente. Apresenta-se então um cenário de não confiabilidade metrológica com as estruturas susceptíveis a acidentes como por exemplo, soltura de parafusos, desengate de rodas ou falhas de juntas.

Uma recente pesquisa entre gerentes de serviços automotivos constatou que 23% de todos os problemas nos serviços de montagem poderiam ser rastreados até o torque medido⁴. Em outro exemplo, um *recall* para uma única turbina aeronáutica, devido a problemas como a má montagem de componentes apertados, desencadeou custos para o fabricante que começaram em US\$ 500.000⁵.

No setor de acreditação de laboratórios para realização de serviços de calibração, o número de laboratórios acreditados para calibração de instrumentos medidores do torque vem aumentando consideravelmente em todos os países. Como exemplos ilustrativos, podemos citar a United Kingdom Accreditation Service (UKAS), onde o número de laboratórios acreditados no Reino Unido que prestam serviços de calibração em torque já são 33 no total⁶ e a Rede Brasileira de Calibração, onde o número de laboratório que prestam serviços de calibração de instrumentos medidores de torque subiu de 16, no ano de 2006⁷, para 38 na última consulta⁸. A inserção de uma nova vertente na padronização da grandeza trará impactos agudos na disseminação do torque por estas redes.

¹ Confiabilidade metrológica é um termo usado na metrologia para definir o conjunto de pré-requisitos a serem definidos e ações a serem tomadas para garantir a aplicação das boas práticas laboratoriais tanto na calibração quanto na utilização de instrumentos e equipamentos de medição⁹.

No apêndice C do BIPM, onde estão cadastradas as melhores capacidades de medição (MCM) de cada Instituto Nacional de Metrologia (INM) em suas determinadas áreas e serviços de calibração, 13 países declaram MCM para serviços de calibração em torque, número que aumentou consideravelmente nos últimos anos. No Sistema Interamericano de Metrologia (SIM), atualmente são 3 países americanos com MCMs declaradas para serviços em medição de torque, sendo que já existem 3 novos solicitando esta inclusão⁹.

Os métodos de calibração e o desenvolvimento dos sistemas padrão a serem utilizados como referência devem acompanhar as novas demandas de projeto que requerem medição do torque. Objeto de constantes estudos durante as últimas décadas, a rastreabilidade da grandeza vem sofrendo mudanças com a adaptação de novas máquinas, novos métodos para cálculos da incerteza de medição e novos regimes de acionamento e carregamento.

1.1 Motivação

As aplicações que utilizam transdutores de torque apresentam os mais diversos regimes de medição, que podem ser caracterizadas pelas seguintes condições:

- Valores das taxas de variação do torque medido;
- Regime do torque estacionário ou transiente;
- Condições cinemáticas do transdutor com o princípio do transdutor podendo ser de reação ou de transmissão do torque;
- Pontos ou regiões específicas a serem avaliadas em curvas de acionamento, como valores de pico e amplitudes ou ponto singular após patamar de estabilidade;
- Valores da taxa de aquisição (intervalo entre leituras) necessários para as medições.

Conforme esses parâmetros se apresentem nas aplicações, a medição do torque pode ser classificada como de regime estático ou de regime dinâmico.

A principal característica do torque em regime estático é a baixa ou inexistente taxa de variação do mensurando no tempo, com regimes estacionários e longos períodos para estabilização do valor a ser medido, onde o sensor não está em movimento no espaço.

Já o torque dinâmico abrange os demais regimes, que apresentam condições mais severas de acionamento como altas taxas de torque em estados transientes, transdutores em rotação, com a presença de acelerações e velocidades angulares, a necessidade de alta frequência de medição para avaliação do regime em curtos períodos de acionamento e a necessidade de atrelar ao valor medido de torque dados referentes a outras grandezas medidas simultaneamente no processo. Os sistemas de leitura de sinais devem permitir uma configuração mais ampla de filtros digitais e taxas de aquisição.

A indústria automotiva realiza a medição do torque em apertadeiras e parafusadeiras utilizadas na linha de montagem. Estas ferramentas devem ser verificadas periodicamente inclusive sob condições dinâmicas, embora utilizando como medidas de referência valores obtidos de transdutores de torque calibrados estaticamente^{1; 4}.

Ainda na área automotiva, os bancos de teste de trens de força (motores e transmissões) ganharão novo nível de confiabilidade metrológica se suas medições passarem a ser dinâmicas, influenciará diretamente nos cálculos da potência transmitida, do rendimento e da relação torque - velocidade desses componentes sob teste.

No setor energético, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) coordena programas de conformidade com foco no desempenho, com o intuito de contribuir para a racionalização no uso da energia no Brasil, fornecendo informações sobre a eficiência energética de equipamentos disponíveis no mercado doméstico através do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE)¹⁰. Uma componente do PBE é coordenada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), que premiam os produtos mais eficientes na etiquetagem do Inmetro e onde está inserido o programa de etiquetagem "Motores Elétricos Trifásicos - Tipo Alto Rendimento"¹¹. Este programa define os níveis mínimos de eficiência para comercialização ou uso no Brasil, de motores elétricos trifásicos de indução tipo rotor gaiola de esquilo. Este tipo

representa a vasta maioria dos motores em uso hoje no comércio e na indústria. Estes motores devem ser testados em laboratórios acreditados e a exemplo do que acontece com a indústria automotiva, o valor de torque medido na transmissão do eixo será utilizado nos cálculos de potência e eficiência atribuídas a esses motores com maior efetividade.

Outras indústrias que fazem uso intensivo de materiais, principalmente os metálicos, também dependem de padrões de torque dinâmico em ensaios que realizam para avaliação dos parâmetros mecânicos, como por exemplo, a fadiga ou impacto torcional¹². Os resultados alcançados por esta pesquisa também irá prover informações e instruções confiáveis acerca da rastreabilidade dinâmica a ser aplicada diretamente no procedimento da norma, a exemplo do que já acontece com a grandeza força para ensaios de máquinas de fadiga uniaxiais.

Na atual cadeia de padronização da grandeza torque, seja ela nacional ou internacional, os transdutores devem ter sua calibração rastreada a padrões consolidados metrologicamente e com níveis de confiabilidade metrológica bem determinados de forma hierárquica. Esta padronização é totalmente estática, o que significa que os sistemas padrão, identificados pelos níveis e os procedimentos de calibração contidos nas relações de rastreabilidade, realizam os torque de referência somente nos regimes estáticos de medição. No entanto, o último nível da cadeia de rastreabilidade contém aplicações que utilizam também o torque em regimes dinâmicos de acionamento e de medição.

A inexistência de padrão e procedimento dinâmicos pode ser ratificada a partir da observação de orientações das próprias Normas atualmente vigentes para a calibração de transdutores de torque. Essas Normas alertam o usuário para as restrições de utilização dos resultados das calibrações apenas para os equipamentos e regimes estáticos, ao mesmo tempo que não definem, em termos técnicos, como se caracterizam aqueles que seriam os regimes "não estáticos" desatendidos por esses procedimentos. Desta lacuna de definição conclui-se que, sob o entendimento das normas, um regime estático de utilização do transdutor se equivale ao regime estático de calibração desse instrumento, ou seja, este abrange apenas aqueles procedimentos ou acionamentos onde os valores de torque, seja o de referência ou o em medição, são estáveis e o sensor está totalmente imóvel. Qualquer outro regime diferente deste pode então ser definido, aos olhos das Normas, como torque dinâmico.

Contudo, na falta de procedimentos específicos e sistemas padrões que tratem das questões dinâmicas dos transdutores, envolvendo desde os pré-requisitos da calibração, como ajustes na montagem e configuração das unidades de leitura, até as séries de medição, os usuários desses instrumentos acabam aplicando a interpretação dos dados das calibrações estáticas também às aplicações com regimes dinâmicos. Essa prática é questionável a partir do momento em que confronta as próprias orientações normativas e compromete a confiabilidade metrológica das medições.

As aplicações que utilizam esses regimes dinâmicos do torque estão se tornando cada vez mais exigentes e os critérios de projeto estão se tornando mais rigorosos no que se refere ao monitoramento da grandeza^{13; 14} enquanto que simultaneamente, os transdutores de torque estão evoluindo e apresentando cada vez mais melhores capacidades de medição nesses regimes¹⁵.

Como exemplo de identificação deste problema, alguns autores chegam a destacar esta ineficiência da rastreabilidade dos transdutores na medição de comportamentos transientes com o valor de torque variando rapidamente¹⁶ e a ineficiência na medição do torque em eixos girantes¹⁷. Outros autores buscam uma "auto rastreabilidade" dinâmica para testar seus sistemas específicos através da montagem de aparelhos que geram um valor de torque que, embora de baixa confiabilidade metrológica, possa ser considerado como de referência dinâmica¹⁸.

Em aplicações de torque por apertadeiras elétricas ou pneumáticas por exemplo, especialistas alertam que o torque de aperto residual, que permanece no componente apertado, e o torque dinâmico, aquele medido na ferramenta, não são idênticos¹⁹.

A busca pela rastreabilidade dinâmica tem sido alvo de pesquisas recentes em outras grandezas mecânicas além do torque, como força e pressão, com grupos de pesquisa dedicados. Como exemplo, pode-se citar o Grupo de Trabalho e Pesquisa em Metrologia de Torque do Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), o Instituto Nacional de Metrologia da Alemanha, que coloca na sua página de apresentação na internet a necessidade de diferenciar o torque estático e o torque dinâmico onde, segundo o grupo, o primeiro consiste dos regimes em que o valor de torque é quase constante, independente do sensor estar em rotação ou não e o

segundo corresponde aos regimes onde o valor de torque a ser medido varia com o tempo²⁰.

A falta de rastreabilidade dinâmica impede atualmente a indústria de fazer medições confiáveis em uma série de aplicações, com consequências para a segurança, qualidade e eficiência dos sistemas projetados. Medições dinâmicas rastreáveis e confiáveis também reduziram enormemente os esforços de desenvolvimento e custos, diminuindo significativamente os recursos investidos¹³.

A partir do que foi exposto até aqui, é possível evidenciar a necessidade de se intensificar as pesquisas em torno da adequação da pirâmide de rastreabilidade da grandeza torque, de forma que apresente uma padronização capaz de verificar os transdutores de torque sob regimes de medição mais semelhantes àqueles operados nas aplicações dinâmicas destes equipamentos.

1.2 Objetivo principal

O objetivo principal desta tese é apresentar os fundamentos para o desenvolvimento da padronização metrológica do torque dinâmico, focando na metodologia de calibração capaz de rastrear os regimes transientes de medição da grandeza.

1.3 Objetivos específicos

O cumprimento do objetivo principal contempla o desenvolvimento de sistemas mecânicos e os seus respectivos subsistemas, capazes de realizar os testes de conceito, tanto do princípio físico a ser adotado quanto da metodologia de medição a ser seguida.

A partir do estudo desses subsistemas, é possível avançar na identificação dos principais parâmetros práticos e teóricos dos elementos e componentes envolvidos a serem considerados nos testes dinâmicos dos transdutores. Estes são parâmetros cuja avaliação específica se torna fundamental ao dimensionamento e à seleção dos métodos e ferramentas úteis à realização deste trabalho.

Os seguintes objetivos específicos podem assim ser definidos:

- a) Definir os regimes de medição e os parâmetros dinâmicos a serem avaliados numa calibração dinâmica do torque;
- b) Evidenciar a viabilidade da aplicação de um princípio físico proposto para a realização do torque dinâmico de referência;
- c) Apresentar as respostas dos transdutores às solicitações dinâmicas e identificar, nas curvas reais de medição, aqueles parâmetros que compõem o resultado de uma calibração;
- d) Desenvolver uma metodologia de calibração dinâmica para os transdutores e um procedimento-guia com instruções sobre a aplicação desta metodologia;
- e) Determinar um *setup* principal preferível, que atenda adequadamente o princípio físico para realização dos parâmetros a serem rastreados, a partir de testes de equipamentos e de instrumentos;
- f) Propor a inserção de novo padrão metrológico na cadeia de rastreabilidade da grandeza torque, onde os resultados dinâmicos devem complementar e não substituir os resultados obtidos das calibrações estáticas.

1.4 Metodologia da pesquisa

Esta pesquisa é de natureza aplicada e visa a solução de questões específicas no campo da padronização e disseminação metrológica da grandeza torque. São realizadas pesquisas bibliográficas e práticas experimentais, além da análise de dados obtidos em outras pesquisas ou medições anteriores.

O diagrama da Figura 1.2 ilustra as etapas da metodologia e como estas se relacionam durante a evolução do projeto. Este diagrama descreve a orientação do estudo e os pontos de publicação de resultados, realimentação dos modelos e intersecção dos subsistemas propostos.

São realizadas revisões bibliográficas e técnicas de documentos disponíveis em foros científicos especializados, na documentação referente ao tema disponível

em Institutos Nacionais de Metrologia e em laboratórios de calibração de transdutores de torque, tanto nacionais quanto internacionais.

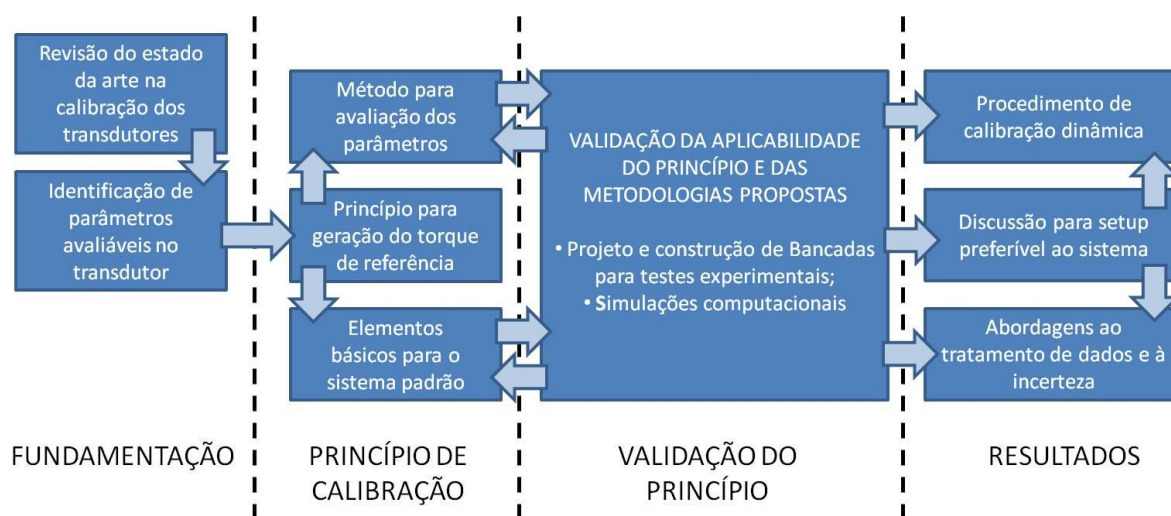


Figura 1.2 - Diagrama representativo da metodologia utilizada na pesquisa.

O cruzamento das informações dessas etapas iniciais auxiliam na identificação de quais parâmetros do transdutor, que são avaliados no regime estático, poderiam ser também avaliados sob o regime transiente para sua caracterização dinâmica.

Os achados iniciais fundamentam os próximos passos da pesquisa que tratam da definição do esboço do regime de acionamento a ser realizado no sistema padrão, considerando, de forma teórica e ideal, um princípio físico que atenda às demandas pela geração do torque dinâmico de referência possibilitando a avaliação dos parâmetros do transdutor identificados nas etapas anteriores.

O passo seguinte dessa metodologia aborda as atividades realizadas para verificar a viabilidade de aplicação do princípio físico ao objetivo de gerar e avaliar determinadas respostas dinâmicas no transdutor. A partir de um desenho inicial com os componentes básicos de um sistema principal, a pesquisa abordou a realização de práticas de medição para a avaliação quantitativa de dados e interpretação de parâmetros.

Para estas práticas foram projetadas bancadas de medição capazes de simular o acionamento e a resposta de subsistemas componentes do sistema principal, onde foi possível reproduzir os regimes de torque e parâmetros de medição a serem utilizados na calibração. Alguns experimentos foram realizados

também para simular, em ambiente controlado, as condições em que esses transdutores são utilizados na indústria.

A partir de resultados obtidos desses subsistemas, as respostas individuais de alguns dos equipamentos envolvidos no sistema principal puderam ser caracterizadas e suas especificações e restrições puderam então ser determinadas de acordo com a sua função na estrutura principal. Essas etapas caracterizam o teste de conceito da proposta.

Simultaneamente às práticas, foram desenvolvidas e tratadas questões referentes aos métodos de medição e avaliação dos dados obtidos. Temas como técnicas de processamento de sinais, métodos de cálculo da incerteza de medição e sequências de acionamento necessárias foram tratados através da aplicação de diferentes ferramentas computacionais e análises estatísticas.

Como resultado dessas abordagens, o procedimento final a ser adotado para as calibrações dinâmicas pôde ser esboçado, abrangendo desde a manipulação inicial das curvas de medição até a identificação dos parâmetros a constar em relatórios de calibração, por exemplo.

A metodologia experimental, utilizando a avaliação dos resultados obtidos desses subsistemas, serviu para a realimentação do modelo teórico inicial, de realização do princípio físico proposto, ajustando-o à realidade dos componentes e dos métodos, atribuindo assim um caráter mais abrangente para os testes de conceito do sistema. Os resultados obtidos da pesquisa foram reportados em formas de relatórios técnicos e artigos científicos publicados em periódicos científicos ou apresentados em congressos (vide Apêndice A).

1.5 Impactos tecnológicos e científicos

A realização do trabalho proposto disponibilizará para a indústria, de uma forma geral, melhoria do conhecimento sobre medições do torque dinâmico e da sua confiabilidade metrológica.

A avaliação dos transdutores de torque sob os regimes transientes de medição introduz uma nova vertente metrológica à sua cadeia de rastreabilidade. A inclusão dos resultados da calibração dinâmica, complementando os resultados

obtidos da calibração estática tradicional, apresenta ao usuário do equipamento uma nova ótica para avaliação de sua aplicação.

Alguns conceitos dinâmicos aplicados à metrologia e desenvolvidos nesta tese podem também contribuir diretamente no entendimento sobre o uso final dos sensores de torque, já que a relação de rastreabilidade permite reaplicar estes conceitos nas medições em campo.

O projeto do sistema dinâmico de calibração traz pontos interessantes para discussão e pesquisa, na medida em que aplica um princípio físico simples para solução de um problema até aqui entendido como complexo, o que lhe dá um *status* de referência para as novas diretrizes de rastreabilidade a serem atribuídas à grandeza torque. O sistema oferece à comunidade científica e tecnológica um passo consistente à prospecção de novas abordagens de calibração e uso dos instrumentos envolvidos.

Os resultados obtidos nessa pesquisa poderão ter impacto direto nas discussões sobre a rastreabilidade dinâmica não somente do torque, mas também em outras grandezas mecânicas que estão sendo estudadas para viabilização de implementação das respectivas rastreabilidades dinâmicas^{13; 21; 22}, principalmente em comitês e grupos de estudos avançados em metrologia, como por exemplo o Programa Europeu de Pesquisa Metrológica (EMRP), o comitê da ISO/TC164/SC5 (*Fatigue testing*) e o comitê IMEKO TC3 (*Force measurement*).

1.6 Organização do trabalho

O Capítulo 2 - Fundamentação da proposta - apresenta uma revisão do estado da arte na calibração de sensores de torque. É feita uma abordagem tanto estática quanto dinâmica de procedimentos, normas e sistemas padrão utilizados nessas calibrações. Um breve histórico da grandeza torque e uma descrição do quadro atual da metrologia dinâmica também são expostos, com destaques aos resultados de estudos prévios que são importantes na fundamentação da proposta de padronização de grandezas mecânicas dinâmicas.

O Capítulo 3 - Princípio da calibração dinâmica - inicia destacando o princípio físico a ser adotado e o escopo da calibração, baseado nas oportunidades e nas

necessidades apresentadas no capítulo anterior. A metodologia de medição visando a geração de um torque dinâmico de referência e uma configuração inicial, são propostas para o sistema. As formas propostas de obtenção e interpretação dos resultados também é demonstrada.

O Capítulo 4 - Materiais e Resultados - reúne os detalhes do projeto, mostrando sua evolução e as diversas direções atingidas na pesquisa no que tange os métodos de medição e a obtenção dos mensurandos, os métodos de estimativa da incerteza de medição e as sequências de ensaios e testes realizados nas bancadas auxiliares. Esse procedimento contém as sequências de medição, os resultados analíticos das curvas medidas e uma estimativa da incerteza de medição. Neste capítulo são apresentados também os resultados experimentais parciais utilizados para avaliação dos componentes e equipamentos envolvidos.

O Capítulo 5 - Conclusão - abre espaço para as discussões a respeito dos resultados atingidos na pesquisa e como esses devem servir para a realimentação dos projetos iniciais do sistema e do método de calibração. São apresentados comentários a respeito das dificuldades encontradas para a realização do estudo, as limitações do escopo e conclusões sobre o projeto e contexto no qual se enquadram os objetivos propostos. É realizada também uma discussão sobre trabalhos futuros inclusive com apresentação de novas propostas.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO DA PROPOSTA

Novas propostas de sistemas ou procedimentos de calibração dependem do estudo do estado da arte para toda a cadeia de rastreabilidade metrológica referente à grandeza. Isso poderá posicionar as novas propostas ao contexto adequado e de acordo com o histórico de desenvolvimento desta grandeza.

Este trabalho de tese incluiu o estudo dos diferentes enfoques de calibrações estáticas e como as necessidades de uso dos instrumentos evoluíram e fizeram surgir propostas para novos métodos de calibração, na tentativa de preencher a lacuna já existente para a rastreabilidade dinâmica da grandeza torque.

Neste capítulo, primeiramente é feito um estudo a respeito das aplicações que utilizam transdutores de torque, detalhando os regimes de medição. Em seguida, descreve-se os princípios básicos de funcionamento de um transdutor de torque, revendo os conceitos de curva de calibração e da rastreabilidade da grandeza.

Os métodos de calibração atuais mais bem estruturados e referendados internacionalmente são apresentados junto com os respectivos sistemas de calibração que os realizam. São avaliados aqueles de melhor desempenho na calibração de sensores, a disseminação estática da grandeza nos vários níveis hierárquicos da rastreabilidade, bem como as Normas de calibração utilizadas.

Discute-se em seguida as pesquisas recentes que tratam de novos métodos de calibração e de caracterização de transdutores de torque, o que introduz a sequência do estudo para o tratamento da rastreabilidade dinâmica da grandeza.

Ao final do capítulo, a concatenação das informações apresentadas contextualiza ambas as abordagens, estática e dinâmica, para a fundamentação da proposta do regime dinâmico a ser adotado em uma nova padronização.

2.1 Regimes de Medição das Aplicações

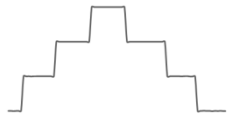
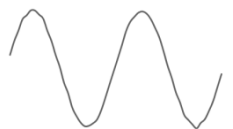
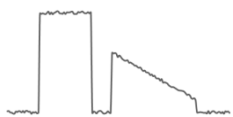

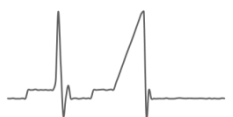




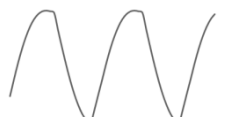
A Tabela 2.1 apresenta diversas aplicações, divididas por campos tecnológicos científicos, que requerem a medição do torque, onde se pode ver como a maior parte delas exhibe características predominantemente do torque em regime dinâmico¹⁵.

Tabela 2.1 - Exemplos de aplicações de transdutores de torque.

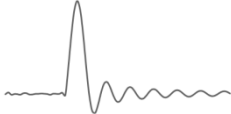
Educação	Ensaio de desenvolvimento	Produção, Qualidade, monitoramento de produto	outras aplicações
Motores elétricos Performance	Bancadas de testes Bobinas Motores elétricos	Controle, regulação Torque de aperto de cápsulas de rosca	Instalações eólicas Performance Torque
Motores a combustão Performance	Motores a combustão Transmissões Geradores Ventiladores Bombas	Alinhamento Pré-carga em rolamento Pré-carga em molas Deslocamento axial	Torre de perfuração Torque em hastes/eixos de furação Acionamentos de posicionamento Bloqueio de características de válvulas Agricultura Máquinas de torque controlado Navios Eixos de transmissão de potência
	Centrais de medição Sensor de torque em configurações de medição versáteis Tetos e janelas móveis	Técnica de aparafusamento Torque de aperto Torque de desaperto (alívio)	
	Reologia Reômetros	Avaliação de funções Torque em manivela Geradores Bombas Ventilador	
	Sensores de torque construídos em automóveis	Correia transportadora Atrito em rolamento Ajustes por interferência Vedações (atrito)	
		Reologia Reómetro	
		Bancos de ensaio para testes de resistência Ferramentas manuais Eletrodomésticos Automóvel Motores de combustão Ensaio de torção	

A Tabela 2.2, que apresenta a caracterização dos regimes de algumas das aplicações da Tabela 2.1, é o resultado da pesquisa em fontes bibliográficas como livros, catálogos, Normas e artigos científicos. A coluna "representação gráfica" apresenta, de forma genérica, os perfis de torque, no domínio do tempo, característicos de cada regime. Esses pequenos gráficos dão uma boa ideia da variedade de perfis a que os transdutores podem estar sujeitos.

Tabela 2.2 - Caracterização dos regimes de medição do torque em algumas aplicações

Exemplos de Aplicações	Características do regime	Representação Gráfica (Torque X Tempo)
<ul style="list-style-type: none"> - procedimentos de calibração estática de transdutores de torque e torquímetros - ensaios de resistência 	<ul style="list-style-type: none"> - patamar de estabilização; - aquisição realizada somente ao final do patamar (taxa de torque nula) - sem oscilações - transdutor de reação 	
<ul style="list-style-type: none"> - viscosímetros (baixa frequência)^{23; 24} - ensaio de fadiga (alta frequência)¹² 	<ul style="list-style-type: none"> - transdutor de reação - uma deformação harmônica senoidal - baixo ruído - alta taxa de torque 	
<ul style="list-style-type: none"> - controle e cálculo de potência consumida em máquinas ferramentas^{25; 26; 27} 	<ul style="list-style-type: none"> - transdutor de reação - oscilação alta do torque no tempo com necessidades de aquisição confiável para realização de controle - patamares e rampas de torque de taxa intermediária 	
<ul style="list-style-type: none"> - verificação de apertadeiras por torque de reação (baixa reprodutibilidade)^{16; 28} 	<ul style="list-style-type: none"> - transdutor de reação - pulsos de torque reativo - valores altos de pico - somente o valor de pico é de interesse - rampas com altíssimas taxas de torque 	
<ul style="list-style-type: none"> - apertadeiras elétricas e pneumáticas^{29; 19; 30; 17} - calibração de apertadeiras (boa reprodutibilidade em juntas flexíveis ou rígidas)²⁹ - faixa de torque muito ampla - relação aperto X ângulo^{29; 17} 	<ul style="list-style-type: none"> - transdutor de rotação - rampas com altíssimas taxas de torque - ruído médio - valores de pico (referência) e da rampa (controle) são de interesse - alta velocidade angular 	
<ul style="list-style-type: none"> - torres hélicas³¹ - extrusoras³² - laminadoras³³ - cálculo da potência transmitida^{34; 35; 36} - frenômetros³⁷ 	<ul style="list-style-type: none"> - transdutor de rotação - patamares de torque (baixas taxas de torque) - alta velocidade angular - alta oscilação com ruído (regime intermitente) 	
<ul style="list-style-type: none"> - ensaio de motores³⁷ - cálculo de potência transmitida³⁷ 	<ul style="list-style-type: none"> - transdutor de rotação - vários patamares de torque pré-definidos (baixas taxas de torque) - baixo ruído - valores altos e constantes de velocidade angular 	
<ul style="list-style-type: none"> - freios^{37; 18} - embreagens^{38; 39; 40} 	<ul style="list-style-type: none"> - transdutor de rotação - rampa com taxas de torque intermediárias - velocidade angular varia com o torque 	
<ul style="list-style-type: none"> - controle de combustão em motores (alta velocidade angular)⁴¹ - direção automotiva (baixa velocidade angular)⁴² - torques de entrada e saída em caixas de redução⁴³ - ensaio torcional direto/aperto (baixa frequência)⁴⁴ - ensaio torcional por fadiga (alta frequência)¹² 	<ul style="list-style-type: none"> - transdutor de rotação - regime periódico com vibração - alta oscilação do torque (valor médio é utilizado) - altas taxas de torque - velocidade angular constante ou variante 	 

Continuação da Tabela 2.2

Exemplos de Aplicações	Características do regime	Representação Gráfica (Torque X Tempo)
- volantes de inércia em aceleração e ventiladores ⁴⁵	<ul style="list-style-type: none"> - pulso de torque - aceleração angular - altas taxas de torque - transdutor de rotação 	

A partir desta prospecção sobre as aplicações industriais que utilizam medição de torque dinâmico, algumas conclusões preliminares podem ser feitas a respeito das características dos regimes explorados, o que embasará a proposta de padronização.

- a) A maioria das medições de torque se dá no período de regime transiente no acionamento. Altas taxas de variação do torque são encontradas com valores acima de $15 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- b) A medição da variação do torque vem sempre acompanhada da medição de outra grandeza auxiliar, geralmente velocidade ou ângulo de rotação. Isso demonstra que a análise da grandeza, como contribuinte para um sistema maior, não deve ser realizada de forma solitária. Um valor de torque não significa muita coisa se estiver sozinho em um gráfico ou planilha.
- c) Os parâmetros das curvas de torque apresentadas nas aplicações variam muito, tanto no que se refere ao seu formato quanto à variação de valores e faixas nominais, que podem ir do baixo torque, como em viscosímetros que trabalham em torno de $1 \text{ N}\cdot\text{cm}$, até torques de partida em motores, que podem chegar a $3000 \text{ N}\cdot\text{m}$. Uma faixa de torque comum a grande parte das aplicações está entre $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ e $100 \text{ N}\cdot\text{m}$.
- d) Quando o transdutor está em rotação com velocidade e carga constantes, alguns usuários entendem que o torque lido pode ser considerado como quase estático, pois não há acelerações no sistema e, portanto, não haveria componentes dinâmicos. Este comportamento é característico dos ensaios de motores em regime constante. Contudo, destaca-se a importância de avaliar os componentes dinâmicos na variação da leitura do torque, principalmente se o motor estiver submetido também a esforços dinâmicos. Algumas aplicações reiteram a importância na avaliação não somente do torque médio, denominado valor DC das

medições, mas também dos valores AC, ou seja, as oscilações da grandeza em torno deste valor médio.

- e) Nos estudos analisados, foi dada forte importância ao método de aquisição dos valores medidos, ou seja, a questão da dinâmica de comunicação é entendida como essencial para a correta interpretação de valores. Transdutores de reação que sofrem variações de torque em um curto espaço de tempo, ou seja, sem o tempo para estabilização do patamar, é um bom exemplo de que a dinâmica de filtros e taxa de aquisição deve também ser investigada simultaneamente às questões mecânicas do equipamento.

2.2 Os Transdutores de Torque

Em uma avaliação cronológica, os equipamentos para medição do torque estático, os chamados transdutores de reação, foram os primeiros a serem desenvolvidos, demandando inclusive amplificadores elétricos e eletrônicos mais simples para aquisição dos sinais do sensor^{15; 46}.

Os transdutores com capacidade para leituras dinâmicas são desenvolvimentos posteriores e passam a permitir a rotação do sensor em conjunto com o eixo que se deseja caracterizar ou medir o torque em transmissão¹⁵. Com a utilização cada vez mais crescente desses transdutores nas aplicações onde há a transmissão do torque dinâmico, as formas de determinação das curvas de carga evoluíram de simples informações hipotéticas e aproximadas *a priori*, para um parâmetro de medição *on-line*, o que permitiu a avaliação dos resultados finais de esforços diretamente sobre o mensurando torque.

O estado da arte nestes sensores é a medição da micro deformação elástica de um elemento mecânico, geralmente em geometria de eixo ou flange, por meio de pontes de extensômetros de resistência elétrica fixadas a ele, as chamadas "Pontes de Wheatstone". Quando o elemento elástico sofre uma torção, os extensômetros também se deformam e tem suas características físicas alteradas, resultando numa alteração de sua resistência elétrica.

Fornecendo uma tensão elétrica constante a essas pontes, a alteração das resistências do circuito durante a torção resultará no seu desbalanceamento em relação a sua condição inicial de repouso, gerando uma variação de tensão do sinal elétrico de saída. Esta variação do sinal de tensão é então a grandeza a ser medida nos amplificadores e sistemas de aquisição de sinais^{15; 46}.

A Figura 2.1 mostra um exemplo de circuito com Ponte de Wheatstone acoplada ao elemento de torção de um transdutor de torque e o esquema elétrico para transmissão desses sinais medidos.

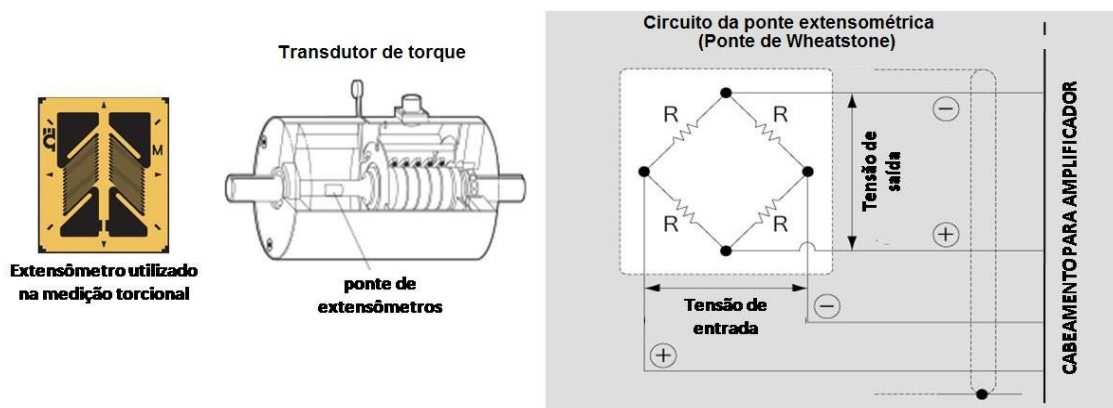


Figura 2.1 - Extensômetro utilizado na medição de efeitos torcionais e ponte extensométrica aplicada a transdutores de torque^{47; 48}.

Portanto, a leitura de um valor de torque pelo transdutor deve corresponder, na realidade, ao resultado da medição da variação de tensão elétrica na saída dos circuitos das pontes de extensômetros após o carregamento torcional aplicado.

A relação entre a grandeza elétrica e a grandeza mecânica é denominada de sensibilidade do sensor e é caracterizada pelas curvas de calibração do transdutor, como será mostrado no Capítulo 2.4.4. O instrumento de torque deve ser calibrado em um sistema mecânico de referência no qual se realiza ou se reproduz, com determinada confiabilidade metrológica, valores de torque conhecidos. Para cada valor de torque gerado no sistema de referência, estará relacionada uma leitura de variação da tensão elétrica no transdutor que está sendo calibrado.

2.3 Rastreabilidade na Calibração do Torque

Os vários níveis hierárquicos estabelecidos na pirâmide de rastreabilidade (Figura 2.2) são divididos conforme a qualidade dos padrões, o princípio de realização e/ou reprodução da grandeza ou as aplicações finais para os equipamentos calibrados. A descrição mais detalhadas dos sistemas de calibração e dos requisitos que cercam esses sistemas em cada nível dão uma ideia da complexidade dessas máquinas quando são confrontadas às necessidades da padronização de alta qualidade. A Figura 2.2 mostra a atual pirâmide de rastreabilidade metrológica da grandeza torque com os diversos níveis de padronização e as relações de entre esses níveis.

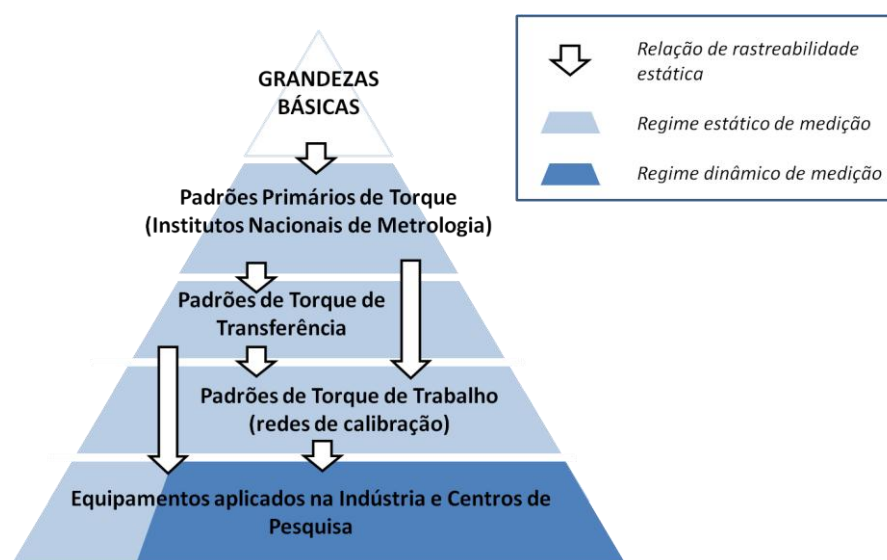


Figura 2.2 - Atual pirâmide de rastreabilidade da grandeza torque.

O nível 1 (topo) representa as grandezas básicas fundamentais com rastreabilidade direta ao Sistema Internacional de Unidades (SI). Na geração do torque primário, essas grandezas são: massa, comprimento e tempo. Suas rastreabilidades estão diretamente acopladas ao BIPM e os INMs apresentam laboratórios com sistemas padrões capazes de reproduzi-las e disseminá-las dentro de um excelente nível de confiabilidade metrológica.

No nível 2 está o estado da arte na realização do torque de referência. Neste nível estão os chamados padrões primários de torque, onde existe a realização da grandeza por máquinas com o princípio dos pesos mortos, que utilizam as

grandezas básicas do nível imediatamente superior com baixos níveis de incerteza. Esses sistemas se encontram nos laboratório especializados dos INMs e são utilizados majoritariamente para a calibração dos instrumentos do nível metrológico imediatamente inferior. Essas máquinas tem seu princípio de funcionamento baseado na geração do torque pelo produto entre os valores de massa, da aceleração da gravidade local e do comprimento do braço de alavanca, conforme mostra a Figura 2.3.

Nos padrões primários, o torque estático de referência é definido pela seguinte Equação 1:

$$T_{e_ref} = m \cdot g \cdot L \quad (1)$$

Onde:

T_{e_ref}	Torque estático de referência	(N·m)
m	Massa	(kg)
g_{local}	Aceleração da gravidade local	(m·s ⁻²)
L	Comprimento do braço de alavanca	(m)

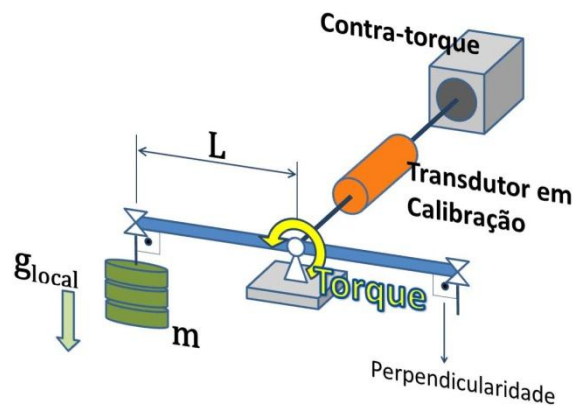


Figura 2.3 - Figura com princípio do peso morto para a realização do torque em um padrão primário.

Porém, além da adoção deste princípio para a geração do torque de referência, a qualificação do sistema como padrão primário dependerá da capacidade desta máquina de apresentar parâmetros funcionais em alto nível de qualidade, como a seguir^{49; 7}:

- A manutenção e exatidão dos alinhamentos entre os centros de transmissão e medição do torque
- A perpendicularidade entre o vetor vertical força peso e o braço de alavanca
- A minimização de efeitos parasitas como forças de atrito nos mancais de suporte dos braços e transmissão do torque
- As mínimas oscilações durante o posicionamento das massas de referência e balanço das partes móveis

Para demonstrar a complexidade de um sistema padrão utilizado sob a realização de um conceito físico simples, a Figura F.1 (Anexo F) mostra o padrão primário de torque do Laboratório de Força do Inmetro (Lafor/Inmetro), cuja faixa de medição é de 20 N·m até 3000 N·m com uma incerteza expandida relativa de 0,01%.

Padrões semelhantes ao do Lafor/Inmetro podem ser encontrados em outros INMs, atendendo diferentes faixas de torque com diferentes valores de incerteza de medição.

O estado da arte na rastreabilidade estática da grandeza torque se apresenta satisfatório no que se refere às faixas de torque alcançadas e os valores de incerteza de medição praticados⁵⁰. O número de países que estão implementando seus padrões nacionais, através dos seus INMs, vem aumentando, o que é um ótimo indicativo para a disseminação e manutenção da comparabilidade internacional da grandeza.

No nível 3 da pirâmide estão os padrões de transferência, compostos por transdutores de torque que se diferenciam dos demais instrumentos pela alta qualidade e os baixos valores de incerteza. Devido a essa propriedade de medição, são mais caros e menos práticos para uso em campo, devendo ser reservados para utilização exclusiva na transferência dos valores de torque medidos nos padrões primários para os sistemas padrões de trabalho de laboratórios de calibração. Com os padrões primários representando a classe de sistemas metrológicos com melhor desempenho, a existência de padrões de transferência de alta qualidade se torna indispensável a partir do momento em que sua utilização como padrão de calibração se amplia, preservando os padrões primários e passando a configurar inclusive como artefato para comparações interlaboratoriais internacionais^{50; 51}.

O Inmetro, no papel do Laboratório de Metrologia de Força (LAFOR), tem se esforçado para organizar e disseminar a metrologia de torque no Brasil⁵² desde o projeto de implantação da grandeza, que culminou com a implementação do sistema primário estático em 2004. O Inmetro tem trabalhado em conjunto com os laboratórios da Rede Brasileira de Calibração (RBC), a fim de que a rastreabilidade da grandeza torque chegue até à indústria com a devida incerteza^{53; 54; 49}.

O nível 4 da pirâmide é composto pelos padrões de trabalho, que são os sistemas de medição ou calibração encontrados nos laboratórios acreditados do país, no caso do Brasil, a Rede Brasileira de Calibração (RBC). Estes padrões são geralmente máquinas de calibração que realizam as medições por comparação entre valores de torque reproduzidos em dois transdutores acoplados em série, como mostra o esquema da Figura 2.4. Como exemplo de máquina deste sistema, está a Figura F.2.

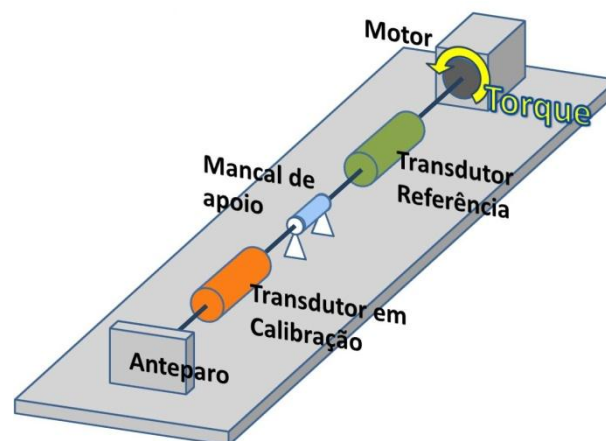


Figura 2.4 - Esquema com o Princípio do método de comparação.

Esses sistemas com princípio comparativo permitem ainda uma outra modalidade de calibração, chamada quase estática ou, calibração pelo método de aplicação do torque contínuo, que será melhor descrito no capítulo 2.5.1.

No nível 5 estão as ferramentas de aplicação de torque controlado, como torquímetros e apertadeiras, que são utilizados diretamente na indústria; e os sensores embarcados, como nos casos daqueles que trabalham em máquinas ferramentas, sistemas de automação, controle e máquinas de ensaio.

2.4 Calibração de Transdutores de Torque

As normas de calibração cumprem papel fundamental no estabelecimento de procedimentos de medição, avaliação dos resultados e classificação dos instrumentos, viabilizando a disseminação da grandeza entre os níveis da pirâmide.

Atualmente, não existe uma Norma internacional comum para calibração de transdutores de torque. Portanto, cada país ou região adota aquela que melhor lhe convém. Dentre as normas disponíveis, pode-se destacar a norma Brasileira ABNT/NBR 12240⁵⁵, o guia de calibração cg-14 da Euramet⁵⁶, a norma Alemã DIN 51309⁵⁷, a Britânica BS 7882⁵⁸ e a norma Norte-Americana ASTM E2428⁵⁹. Todos estes documentos apresentam procedimentos de calibração muito semelhantes, com apenas algumas particularidades e são aplicáveis somente aos transdutores de torque com calibração estática.

A seguir, são apresentados os pontos principais das normas de calibração de transdutores de torque no que tange os procedimentos de calibração e classificação dos instrumentos. Alguns dos parâmetros levantados terão um estudo mais dedicado no decorrer da tese conforme seu poder de contribuição ou condição de relação relevante com aqueles parâmetros a serem buscados na proposta de calibração dinâmica dos transdutores.

2.4.1 Escopo e Procedimento de Calibração

A norma Norte-Americana para calibração de transdutores de torque⁵⁹ define em seu escopo que o procedimento é pretendido para a calibração dos instrumentos de medição de torque estáticos ou quase estáticos (torque aplicado continuamente com baixíssima taxa de variação), destacando não ser aplicável para calibrações ou medições de torque em alta velocidade (instrumento em rotação e altas taxas de variação). Da mesma forma, a norma Britânica⁵⁸ também define que os resultados da calibração e as respectivas classificações, que qualificam o transdutor calibrado, são descritas somente para o modo estático de medição.

As normas Alemã⁵⁷ e Brasileira⁵⁵, trazem em seu título a expressão "Calibração de equipamentos de medição de torque estático". A norma Alemã ainda define em seu anexo A, de orientação normativa para a utilização dos equipamentos

calibrados, a instrução que a calibração é válida apenas para os casos de aplicações em que o transdutor de torque é utilizado em acordo com as condições da calibração indicadas no certificado de calibração, especialmente quanto às configurações da unidade de leitura de dados, como a tensão de alimentação, a resolução, o filtro, etc.

Especificamente por serem muito semelhantes o procedimento de calibração destas Normas, tomou-se aqui a Norma Brasileira como fonte de referência para a discussão dos pontos principais destes procedimentos. Quando as Normas apresentarem discordâncias de procedimento, estas serão identificadas.

As Normas de calibração são procedimentos muito bem estabelecidos e já testados de várias formas, por exemplo por meio de comparações interlaboratoriais de equipamentos e até mesmo por meio do entendimento mútuo dos diferentes grupos de pesquisa distribuídos nas regiões. Avaliando os procedimentos das Normas, pode-se perceber que existe uma convergência a um procedimento comum. Isso poderá, futuramente, se converter em um documento único, provavelmente em nível de norma ISO.

2.4.2 Os padrões de referência

A Norma não determina que tipo de sistema padrão deva ser utilizado para gerar o torque de referência, podendo ser este então um daqueles descritos no Capítulo 2.3 como um padrão com princípio de pesos mortos com braço de alavanca, como o princípio representativo do estado da arte do nível 2, ou um padrão por comparação dos níveis 3 e 4, com um transdutor de referência acoplado em série ao transdutor a ser calibrado. No entanto, deve-se considerar que a incerteza de medição do torque de referência é um dos parâmetros que determinam a classificação final dos instrumentos em calibração (ver última coluna da Tabela 2.3).

As Normas também orientam os usuários com uma série de instruções que devem ser seguidas preliminarmente à aplicação dos carregamentos com os torques de referência, onde se destacam:

- Alinhamento entre os transdutores e os acoplamentos (não especifica um procedimento para essa verificação);

- Geometrias adequadas para os acoplamentos de fixação do transdutor à estrutura do padrão;
- Necessidade de estabilização do equipamento elétrico, que deve permanecer ligado por aproximadamente 15 minutos;
- Faixa de temperatura entre 18°C a 28°C variando no máximo $\pm 1^\circ\text{C}$ durante as medições;
- Resolução deve ser adotada como o valor equivalente ao menor incremento do display ou a média da variação deste incremento quando detectada algum tipo de instabilidade;
- Aplicação de pré-cargas no valor máximo da faixa calibrada.

2.4.3 Carregamentos

Os padrões devem permitir que o transdutor em calibração possa ser desmontado e remontado em outra posição, geralmente com um giro determinado em intervalos de 120° ou 90° em torno de seu eixo.

A faixa de torque a ser calibrada é dividida em 8, 5 ou 3 pontos distribuídos o mais homoganeamente possível na faixa nominal do transdutor, com carregamentos crescentes e decrescentes, a depender do perfil da série. Devem ser aplicadas séries de carregamento de acordo ao nível de exatidão do transdutor em calibração, ou seja, a classe que este pretende atender. Essa pré-classificação segue requisitos baseados tanto na demanda do serviço, por parte do usuário, quanto na experiência do corpo técnico responsável pela calibração no laboratório.

Neste ponto é importante destacar que as Normas se diferenciam um pouco, onde alguns carregamentos, como em ^{55; 57}, aplicam séries decrescentes em todas as posições de montagem, outros solicitam a medição em descarregamento apenas na última posição de montagem⁵⁸. A Figura 2.5 mostra diferentes séries de carregamentos para avaliação de um sensor pré-classificado como classe 0.1 nas diferentes Normas.

Os dois possíveis métodos de carregamento e descarregamento do torque definem bem o regime nos quais os transdutores são testados, como a seguir:

- Puramente estáticos - os carregamentos em cada ponto de torque são estabilizados por um tempo mínimo de 30 s antes de se realizar a leitura do valor de torque do transdutor em calibração;
- Modo contínuo (quase-estático) - típico de sistemas por comparação onde a aplicação do torque se aproxima do valor alvo muito lentamente e o tempo de estabilização é reduzido para 5 s.

A diferença prática entre esses dois métodos foi mostrada em ⁶⁰ e está destacada no capítulo 2.5.1 desta tese.

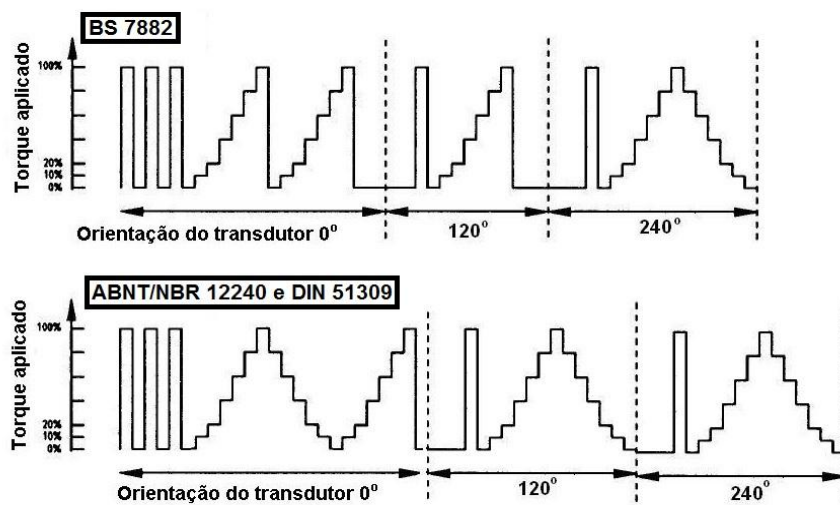


Figura 2.5 - Séries de carregamento para a classe 0.1⁶¹.

2.4.4 Parâmetros obtidos da calibração

Os parâmetros da calibração são determinados a partir de cálculos pós-carregamentos e medições. Para cada sentido de aplicação do torque, horário ou anti-horário, as Normas calculam os seguintes parâmetros para os transdutores:

- Resultados da calibração*: resultado das médias aritméticas do mensurando, considerando as diferentes posições do transdutor e os valores medidos nas direções crescente e decrescente. Os demais parâmetros da calibração deverão ser referenciados relativamente aos resultados da calibração em cada ponto;
- Repetibilidade*: grau de concordância entre dois valores consecutivos de um mesmo ponto de torque, em uma mesma posição de montagem, como

- as duas séries de carregamento crescentes aplicadas em 0° (ver Figura 2.8);
- c) *Reprodutibilidade*: grau de concordância entre valores consecutivos de um mesmo ponto de torque em diferentes posições de montagem (ver Figura 2.8);
 - d) *Deflexão residual (erro de "zero")*: máximo valor residual entre as séries de medição (ver Figura 2.8);
 - e) *Erro de interpolação*: grau de concordância entre os valores medidos e aqueles calculados de curvas de ajuste. Essas curvas podem ser lineares ou polinomiais, geralmente equações de 3° grau. Uma curva de ajuste linear mostra, através do erro de interpolação, o desvio de linearidade do transdutor quanto à sua sensibilidade nominal.
 - f) *Erro de reversibilidade*: avaliação da histerese da instrumentação através do grau de concordância entre valores medidos de torque para direções crescente e decrescente de um mesmo ponto de torque da faixa (ver Figura 2.8). O erro de reversibilidade de um transdutor é definido como a diferença das medições de um determinado ponto de torque nas condições crescente e decrescente⁴⁴, como mostrado na Figura 2.6, com um gráfico genérico da curva de comportamento de um transdutor e os diversos parâmetros identificados. A histerese é dependente da qualidade do extensômetro de resistência elétrica e da forma com que este foi colado ao elemento elástico do transdutor para sua instrumentação. Por esse motivo, as especificações dos extensômetros incluem valores para diferentes parâmetros de instalação⁵⁵. Cada série de medição apresenta sua própria histerese e a intensidade desta dependerá dos valores de carregamento máximo nas séries. Esse fenômeno é melhor explorado no capítulo 2.5.1.
 - g) *Incerteza do torque de referência*: incerteza expandida de medição dos valores de torque de referência aplicados pelo ou medidos no sistema padrão de torque.

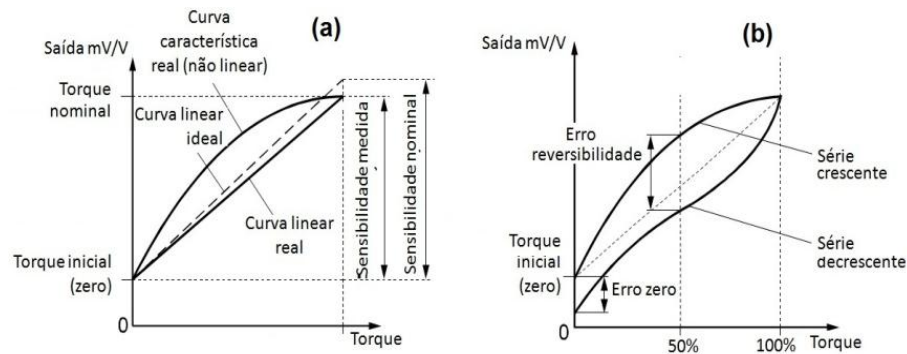


Figura 2.6 - Gráficos característicos de um transdutor de torque: (a) curva de não linearidade; (b) parâmetros de zero e histerese⁴⁶.

- h) *Creep de descarregamento ou carregamento*: dependência do tempo para a reação do transdutor a um determinado estímulo, podendo ser o carregamento ou o descarregamento de torque. No elemento elástico do sensor, a instrumentação via extensômetro de resistência elétrica está susceptível ao fenômeno, ou seja, mesmo com uma carga constante e estável aplicada ao sensor, o material continua a se deformar lentamente na direção da carga⁶². A Figura 2.7 mostra curvas de *creep* de descarregamento para diferentes padrões de transferência, que foram usados em⁴⁶ para uma comparação interlaboratorial. Observa-se que o *creep* relativo está na ordem de 10^{-4} para tempos de descarregamento menores que 1 minuto. Quanto melhor o transdutor, ou quanto melhor as qualidades do elemento elástico e da instrumentação menor será o seu resultado de *creep*. No procedimento da Norma, o *creep* medido é a variação do valor de zero após 3 minutos de remoção da carga máxima aplicada no último carregamento de pré-carga. O *creep* é um parâmetro novo nestes procedimentos de calibração para caracterizar os sensores e não é usado para a classificação (ver capítulo 2.6.1).

Para melhor ilustrar e ao mesmo tempo resumir como são obtidos esses parâmetros, a Figura 2.8 mostra um exemplo de quais pontos das séries de carregamento da norma brasileira são utilizados para o cálculo de alguns desses parâmetros.

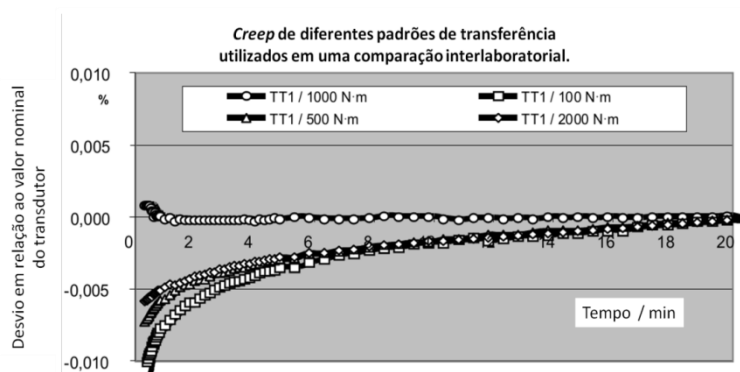


Figura 2.7 - Gráfico de creep de descarregamento para diferentes padrões de transferência utilizados em uma comparação interlaboratorial⁵¹.

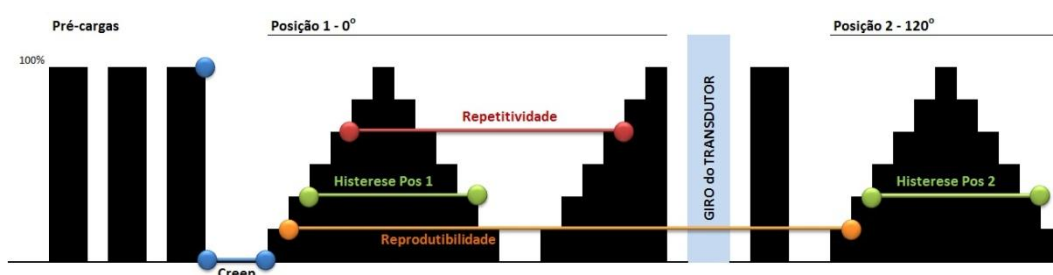


Figura 2.8 - Exemplo de identificação dos pontos utilizados nas séries de medição para cálculo de alguns dos parâmetros da calibração.

Ao final da calibração, o transdutor calibrado deverá ser classificado em cada ponto medido da faixa e de acordo com os valores obtidos para os parâmetros, como mostra a Tabela 2.3 com os valores máximos admissíveis de cada parâmetro em cada classe.

Tabela 2.3 - Parâmetros de classificação dos instrumentos de medição de torque⁵⁵.

Classe	Valores máximos admissíveis relativos ao Resultado da Calibração / %					
	Parâmetros da calibração					Incerteza de medição expandida relativa do Torque de Referência
	Reprodutibilidade relativa	Repetibilidade relativa	Erro de zero relativo	Erro de reversibilidade relativo	Erro relativo de indicação ou interpolação	
0.05	0,050	0,025	0,0125	0,063	± 0,025	0,010
0.1	0,10	0,05	0,025	0,125	± 0,05	0,020
0.2	0,20	0,10	0,050	0,250	± 0,10	0,040
0.5	0,50	0,25	0,125	0,63	± 0,25	0,10
1	1,0	-	0,25	1,25	± 0,5	0,20
2	2,0	-	0,50	2,50	± 1,0	0,40
5	5,0	-	1,25	6,25	± 2,5	1,0

Essa classificação funciona como uma interpretação da qualidade de um equipamento contemplando os diversos parâmetros calculados da calibração. A

classe a ser considerada para um ponto da faixa será aquela correspondente à maior classe atingida pela avaliação dos parâmetros. Por exemplo, se um ponto calibrado do transdutor atingir classe 0.1 ou classe 0.05 para todos os parâmetros exceto o erro de reversibilidade, que tenha ficado como classe 0.2, esta última deverá ser considerada como a classe final daquele ponto.

No que se refere à incerteza de medição, os procedimentos para sua estimativa têm caráter informativo nas Normas e são inclusões recentes nestes documentos⁶³. Os parâmetros que contribuem para o cálculo da incerteza de medição são praticamente os mesmos utilizados para a classificação, ou seja, a reprodutibilidade, repetibilidade, reversibilidade, desvios da curva de interpolação, erro de zero, incerteza do sistema padrão de referência e a resolução adotada. De acordo com ⁶¹ as Normas podem apresentar diferenças nos resultados obtidos para esses parâmetros. Por exemplo, valores de incerteza obtidos através de procedimentos da norma Britânica podem atingir o dobro dos valores obtidos da norma Brasileira ou até mesmo o triplo.

A incerteza de medição obtida do procedimento de calibração estática do transdutor é um parâmetro importante que deve ser considerado para o cálculo da incerteza de medição do procedimento dinâmico. O capítulo 4.4 trata as questões específicas da incerteza de medição.

2.5 Novas abordagens à rastreabilidade metrológica da grandeza torque

A busca por maior confiabilidade metrológica, praticidade e melhor exatidão dos resultados obtidos nos sistemas de calibração estática de transdutores de torque são os temas que predominam nas mais recentes pesquisas divulgadas na área.

O avanço nos estudos científicos visando melhorias da grandeza torque em termos de avaliação e alcance metrológicos, como o aparecimento de sistemas com novos princípios físicos e faixas de calibração em níveis menores de incerteza, se intensificou a partir da década de 90. À frente das iniciativas de pesquisa da grandeza, pode-se destacar o Instituto Nacional de Metrologia da Alemanha (PTB), que vem apresentando ao longo desses últimos, anos além dos resultados no

aprimoramento de seus sistemas de calibração⁶⁴, novos métodos de calibração para a geração do torque de referência por aplicação contínua e alternada^{65; 66} e também novos conceitos para o cálculo da incerteza de medição destes sistemas e calibração⁶⁷.

Este fato fica evidente quando observamos a evolução no tratamento científico dado à grandeza torque dentro da Confederação Internacional de Metrologia (IMEKO), instituição que possui em seu quadro um total de 24 comitês técnicos, onde cada um trata de um grupo de grandezas correlacionadas e que contam com alto nível de especialistas em medição e instrumentação. O comitê técnico TC3 existe desde 1967 e até o ano de 1998 tratava distintamente apenas as grandezas mecânicas Força e Massa, onde durante os congressos e conferências promovidos pela instituição, as discussões sobre torque aconteciam em pequenas seções inseridas na seção maior de metrologia de força. Até então, o torque era entendido apenas como uma grandeza derivada da força, principalmente por considerar que sua geração e referência fossem baseados simplesmente no princípio do momento torcional gerado por uma força aplicada a uma distância conhecida do centro de rotação ou ponto de reação de um corpo.

Mas a partir do ano 2001, a grandeza torque começou a ser compreendida de forma independente, configurando uma nova área dedicada de pesquisa inserida no comitê técnico TC3. Na conferência realizada naquele ano, pela primeira vez houve seções totalmente dedicadas para a apresentação de artigos e discussão específicos da grandeza²¹.

Algumas pesquisas recentes ratificam a motivação desta tese sobre a existência de uma lacuna na cadeia de rastreabilidade metrológica da grandeza torque no que tange à necessidade de testar e calibrar os transdutores em regimes de acionamentos diferentes do tradicional método estático, e reconhecidos esforços já provocaram significantes melhoras no entendimento destas questões.

A seguir estão mostradas as pesquisas mais recentes para novos métodos de calibração e é feita uma análise sobre a contribuição da proposta desta tese nesse contexto.

2.5.1 Calibração pelo Método Contínuo

O método tradicional de calibração é chamado "método puramente estático" pois, de acordo com as Normas, a aplicação do torque de referência pelo padrão deve ser feito em degraus e deve respeitar um período de estabilização de aproximadamente 30 s antes da aquisição do valor de torque no instrumento em calibração. A Figura 2.9 mostra uma curva real de medição do torque em um transdutor sendo calibrado no padrão primário do Lafor/Inmetro (ver Figura F.1 para referência dos componentes e partes do padrão). O patamar de estabilização em torno do valor de 10 N·m precede o momento de aquisição do valor do ponto de calibração lido no transdutor.

A colocação das massas acontece no primeiro degrau da curva quando o transdutor se deforma e o conjunto do braço se ampara sobre o apoio para o braço. Esse apoio restringe a continuação de aplicação da carga diretamente apenas com a colocação das massas. Para atingir o valor de torque de referência, neste caso 10 N·m, é necessário acionar o sistema de contra torque da máquina, que gira o conjunto solidário braço-transdutor até que a carga de torque, referente às massas somente, esteja totalmente suportada no transdutor e o apoio para o braço fique livre. A partir deste instante, o conjunto deve ser girado até que o braço fique na posição de referência horizontal. Isso garante a perpendicularidade entre a força peso e o eixo do braço de alavanca.

Essa rampa de aplicação do torque, entre os instantes 15 s e 50 s na Figura 2.9, não está rastreada pois, para o padrão e o procedimento em Norma, somente o valor do ponto de zero e o valor do ponto de carga após estabilização devem ser considerados. Pode-se observar que apenas para um ponto de calibração da faixa, o tempo total foi de aproximadamente 90 s.

O método contínuo de calibração permite que a aplicação dos pontos de carga seja realizada de maneira mais rápida, com uma redução no tempo de até mesmo 10 vezes. Embora esteja discriminado nas Normas como um dos procedimentos aceitos para aplicar o carregamento, ainda não é muito utilizado e está sendo objeto de pesquisa. Mudanças rápidas nos valores de torque fazem surgir efeitos indesejados no comportamento do transdutor como os fenômenos de *creep* e altos erros de reversibilidade. Ambos os fenômenos são semelhantes em sua interpretação para a caracterização de um sensor, mas com algumas nuances.

Outros parâmetros da medição que influenciam no método são os ajustes de aquisição de dados, como filtros digitais, taxas de amostragem e processamento de dados.

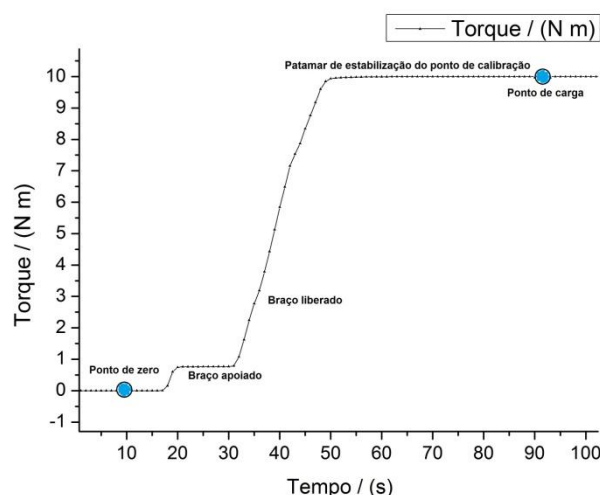


Figura 2.9 - Curva de medição real de um transdutor sendo calibrado no Sistema Padrão Primário de Torque do Inmetro pelo método "puramente estático"⁶⁸.

A investigação mais detalhada do método contínuo de calibração é importante pois serve como uma migração entre as interpretações puramente estáticas e aquelas dinâmicas a serem elaboradas na nova proposta de padronização. Os parâmetros destacados neste capítulo através da apresentação e discussão de resultados revisados de pesquisas anteriores são também parte da fundamentação da proposta de padronização dinâmica, seja como características dos transdutores a serem avaliadas pelo novo método dinâmico, ou como parâmetros de ajuste de acionamento ou aquisição de dados.

Brüge⁶⁶ apresenta um estudo para levantar quais as principais considerações a serem feitas quando na aplicação do método de calibração contínuo. O autor aborda questões como as necessidades de amplificadores com leitura simultânea de dois canais, uma taxa de aquisição compatível com a quantidade de pontos desejada para a interpolação e a consequência da aplicação de filtros digitais na estabilização e sincronização dos sinais. Sobre o comportamento dos transdutores a serem utilizados como referência, segundo o autor, o coeficiente de *creep* tem alta influência em seu comportamento em carregamentos contínuos. Como exemplo da influência deste parâmetro, o autor mostra que o desvio de *creep* relativo à sensibilidade de um transdutor calibrado em um sistema puramente estático, que

leva 200 s para retirar a carga de 100% até 0% da faixa, é de aproximadamente 0,003% da faixa, enquanto que este parâmetro alcança 0,009% para o transdutor calibrado continuamente, com um descarregamento mais rápido de aproximadamente de 25 s. O autor ainda considera que a análise do *creep* para tempos de carregamento menores que 2 s deva ser realizada para aplicações em regimes com acionamentos semelhantes a pulsos ou carregamentos oscilatórios, que não corresponderiam ao regime do método contínuo. Por fim, conclui que é possível alcançar uma classificação 0.2, segundo a Norma, para a calibração de transdutores por esse método.

De acordo com Brüge⁶⁹ o *creep* é proporcional ao carregamento, ou seja, um torque de 50% da faixa nominal do transdutor deve produzir um *creep* também equivalente a 50% do *creep* obtido com o carregamento de toda a faixa. O autor ainda destaca que o valor obtido para o *creep* de descarregamento dependerá do histórico de carregamentos por que passou o transdutor, ou seja, quantas vezes foi carregado e por quanto tempo foram mantidas essas cargas. O autor ainda destaca que o *creep* afeta a quantificação do erro de reversibilidade de um sensor e sua susceptibilidade à cargas dinâmicas.

Brüge e Andreas⁷⁰ apresentam um estudo sobre o comportamento do transdutor quando carregado parcialmente (subfaixas) em sua faixa de medição nominal. Devido à histerese, somente os caminhos de aplicação crescente do torque se repetem para as várias subfaixas, enquanto que no retorno de descarregamento do torque, a curva muda seu comportamento, como mostra a Figura 2.10.

Quanto menor o valor máximo dessa subfaixa, menor o comportamento de histerese do transdutor. O método de aplicação contínua do torque foi utilizado para esse estudo mas somente no intuito de melhor controlar as aplicações de passos de torque, o que não pode ser feito pelo sistema de aplicação totalmente estático.

Brüge, Andreas e Konya⁷¹ mostram resultados obtidos de aplicações contínuas do torque em diferentes taxas para um sistema secundário de calibração por comparação de transdutores. Um transdutor com baixa influência do *creep* nos parâmetros de sensibilidade nominal e de histerese é utilizado como referência. Para levantamento desses parâmetros, os carregamentos foram feitos em séries sequenciais simplificadas, com medição em 50% da faixa no torque crescente até 100% da faixa e 50% da faixa no torque decrescente, como mostra a Figura 2.11.

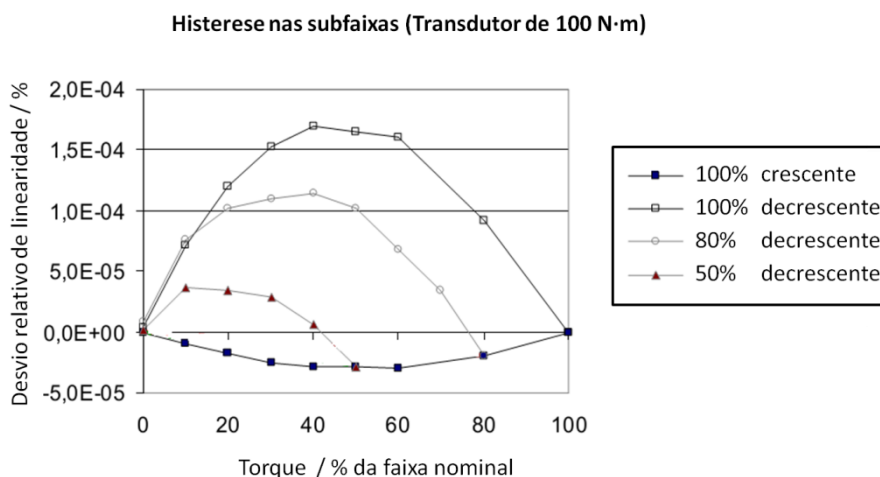


Figura 2.10 - Diferentes comportamentos de histerese nas subfaixas de um transdutor de 1000 N·m testado no método contínuo⁷⁰.

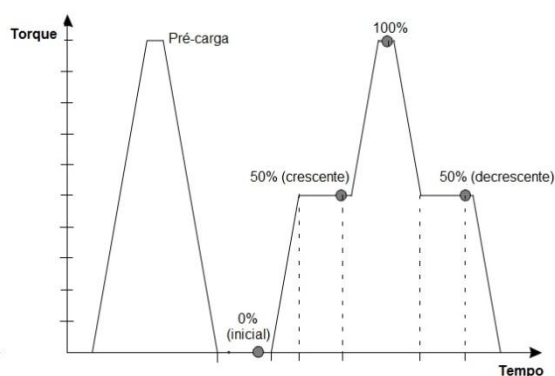


Figura 2.11 - Perfil dos carregamentos simplificados utilizados para testes de creep e histerese de um transdutor para servir de referência no método contínuo⁷¹.

Após estes carregamentos, os transdutores de torque são então medidos e os valores obtidos desses mensurandos no modo contínuo são comparados àqueles obtidos pelas suas calibrações no método direto, ou puramente estático. Como exemplo de resultados, a Figura 2.12 mostra as curvas de desvio de linearidade obtidas dos testes de um transdutor tanto pelo método puramente estático, equivalente a um tempo de carregamento de 224 s para aplicação do valor nominal de 100 N·m, quanto pelo método contínuo, nos tempos de carregamento de 31 s e 6 s, o que equivale a taxas médias de torque de aproximadamente 3 N·m·s⁻¹ e 17 N·m·s⁻¹ respectivamente.

Uma comparação entre os métodos mostrou, para tempos de carregamento máximo acima de 50 s, um desvio relativo máximo na ordem de grandeza de 5·10⁻⁵.

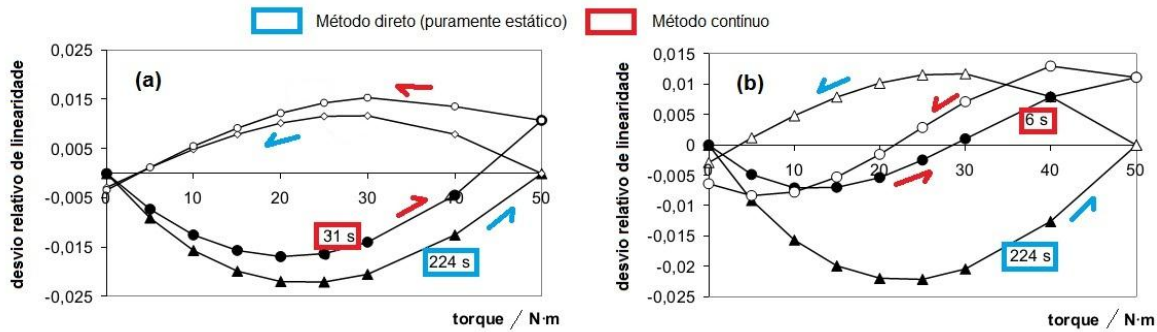


Figura 2.12 - Curvas de calibração para carregamento e descarregamento (a) nos métodos de aplicação direta e contínuo com 31 s e (b) nos métodos de aplicação direta e contínuo com 6 s⁷¹.

Porém, os autores detectaram que as taxas de carregamento muito altas, ou seja, com tempos de carregamento menores que 50 s para atingir o fundo de escala, distorcem os resultados obtidos, o que segundo eles é um fenômeno do carregamento com características dinâmicas que não podem ser simplesmente corrigidos por ajustes de interpolação, fugindo do alcance metrológico do método contínuo. A Figura 2.13 mostra o comportamento de um dos transdutores testados para diferentes tempos de aplicação da carga nominal, onde pode-se observar que na região de tempo menor que 50 s, os desvios tanto de sensibilidade quanto de histerese são maiores.

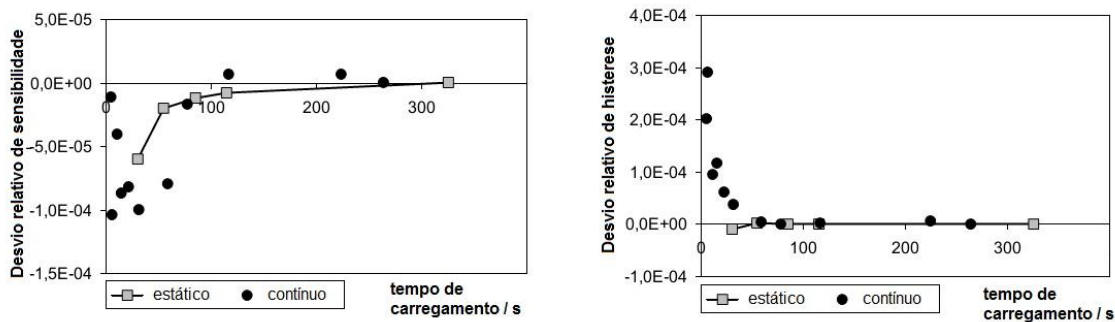


Figura 2.13 - Comparação entre os métodos puramente estático e contínuo para (a) desvio de sensibilidade e (b) desvio de histerese do transdutor⁷¹.

Nattapon e Tassanai⁶⁰ apresentam o estudo mais recente na comparação entre o método puramente estático e o método contínuo. São avaliadas as influências de parâmetros como ajuste de filtros digitais e a velocidade de aplicação do torque na incerteza de medição do método contínuo. O estudo mostrou um desvio relativo entre os métodos de aproximadamente 0,01%, o que seria suficiente para atingir a classe 0.2 segundo a Norma utilizada. Diferentes filtros digitais foram

utilizados nas medições em ambos métodos. No método contínuo, a velocidade de aplicação do torque também foi variada para cada filtro selecionado. A Figura 2.14 mostra o desvio de linearidade dos diferentes filtros no método de aplicação puramente estático, onde a faixa de torque testada foi de 5 N·m. Observa-se, nesta figura, uma variação maior desse desvio nos pontos de mais baixo torque.

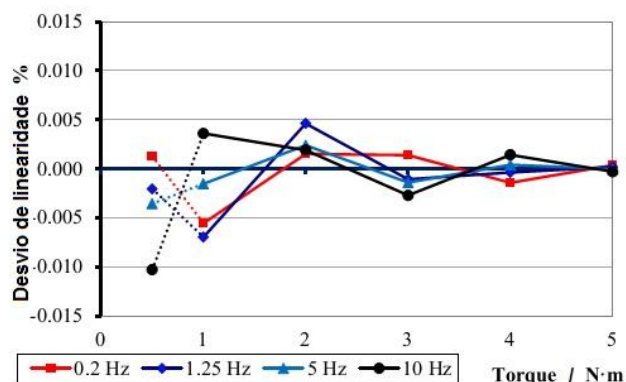


Figura 2.14 - Método puramente estático para diferentes filtros digitais⁶⁰.

A Figura 2.15 mostra os desvios de interpolação, para uma curva de ajuste do 3º grau, dos dados medidos em diferentes combinações de filtro (0,2 Hz e 10 Hz) e taxa de torque (0,14 N·m·s⁻¹, 0,11 N·m·s⁻¹, 0,07 N·m·s⁻¹ e 0,04 N·m·s⁻¹). Observa-se que filtros com frequências de corte mais altas também apresentam maiores variações nas leituras.

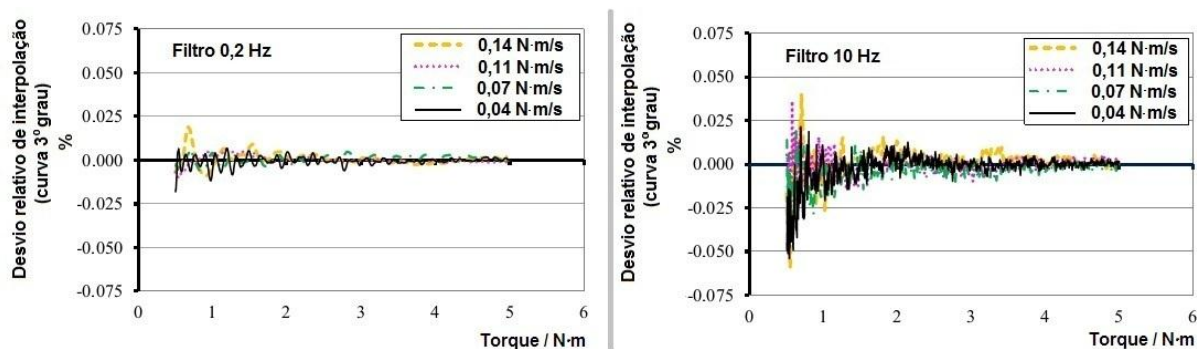


Figura 2.15 - Método contínuo para diferentes filtros digitais e diferentes taxas de aplicação do torque⁶⁰.

Os autores concluem que os ajustes de filtro e taxas de aplicação do torque influenciam diretamente no procedimento contínuo, variando os resultados da calibração, da linearidade, da repetibilidade e da incerteza de medição. Observadas essas variações, uma combinação ideal de filtro e taxa pode ser tomada para a

aplicação e o método ser utilizado em preferência ao método puramente estático pois, segundo os autores, reduz o tempo de calibração em até 4 vezes.

2.5.2 Avaliação do torque de transmissão em bancos de teste de motores

Andreas Brüge⁷² apresenta um primeiro estudo sobre a influência da rotação em transdutores de torque rotacionais calibrados em condições estáticas, onde utiliza os fundamentos da resistência dos materiais e dinâmica de estruturas para analisar a influência da velocidade de rotação do transdutor na leitura do torque. A teoria de força centrípeta é aplicada ao corpo do transdutor (eixo cilíndrico) em rotação para a determinação analítica da influência desta força na sensibilidade do transdutor, ou seja, quando a variação de resistência elétrica é proporcional ao valor nominal de torque. O autor conclui que, para velocidades abaixo de 600 rpm, a prática comprovou a teoria, com influência da velocidade sendo menor que 0,1 %. Para velocidades mais altas, a avaliação da alteração do valor de torque zero mostrou alteração na ordem de 0,1%/1000 rpm. Ao final do artigo, o autor destaca que o sistema utilizado para verificação em alta velocidade do torque zero poderá apresentar melhores resultados se o dispositivo de conexão do eixo, no caso o mancal de rolamento, for substituído por mancais com outros princípios e menor atrito.

Andrae *et. al.*³⁴ apresentam um estudo sobre a influência da velocidade na medição de torque. O método utilizado consiste em comparar leituras de torque simultâneas do transdutor e do dinamômetro de reação, que é realizada estaticamente, como exemplifica a Figura 2.16. Os resultados mostram um desvio de menos de 0,02% entre o transdutor em linha (flanges de torque) e a célula do dinamômetro. Concluiu-se que a maior influência para isso deve-se a um desvio da linearidade e existência de histerese no eixo de medição.

O uso de transdutores de torque em linha para medição da grandeza em bancos de teste de motores é uma das aplicações mais frequentes destes instrumentos, uma vez que substituíram a medição indireta do torque que era feita por células de carga acopladas à carcaça dos freios dinamométricos. Essa aplicação tem sido objeto de estudos de vários autores na tentativa de adaptação dos

parâmetros estáticos, obtidos da calibração destes sensores, às demandas dinâmicas desses processos.

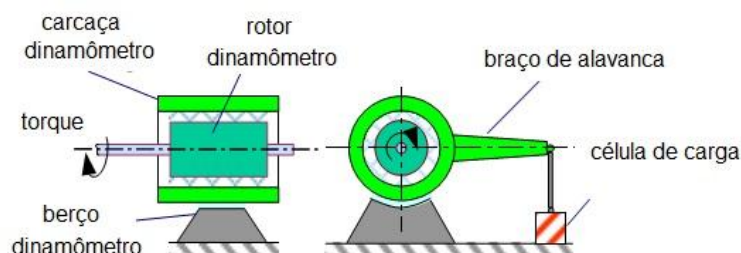


Figura 2.16 - Sistema tradicional de medição do torque em bancadas dinamométricas³⁴.

As tolerâncias para o torque estão em torno de 2% para motores a combustão e 0,5% para motores elétricos. Isso se deve principalmente às medições nos motores elétricos que ocorrem em patamares constantes de torque e de velocidade angular^{34; 35; 36; 37; 45}.

Andrae⁷³ e Bruns e Wegener⁷⁴ publicaram dois artigos sobre as principais considerações para a transmissão de torque nos eixos de bancos de ensaio de motores com uma abordagem a esta calibração. Quando estes transdutores são usados em linha, há uma série de parâmetros estáticos e dinâmicos que, a depender de fatores como montagem, estrutura, acoplamentos, alinhamento de componentes e o comportamento elástico das articulações, podem influenciar na incerteza de medição do transdutor, originalmente obtida a partir da calibração estática realizada no sistema padrão de um laboratório e baseada na norma DIN 51309⁵⁷.

Segundo os autores, o método mais utilizado na verificação dos bancos de teste de motores é o sistema com massa e braço de alavanca, embora este método apresente problemas, como o surgimento de forças parasitas quando o braço não está sobre suportes (Figura 2.17a) e problemas de atrito nos rolamentos quando estes são utilizadas, tais como apoio para o braço e transdutores (Figura 2.17b). Todas essas desvantagens podem ser evitadas se transdutores de torque de referência são usados em substituição aos sistemas de braço de alavanca (Figura 2.17c).

No entanto, mesmo os sistemas que usam transdutores de torque de referência, onde apenas as duas leituras de torque deveriam ser consideradas para a comparação, ainda não é suficiente para caracterizar o banco de testes, uma vez que se entende que a calibração do transdutor de referência, realizada em

laboratório, utiliza condições de montagens e acionamento estático totalmente diferentes daqueles aplicados *in loco*.

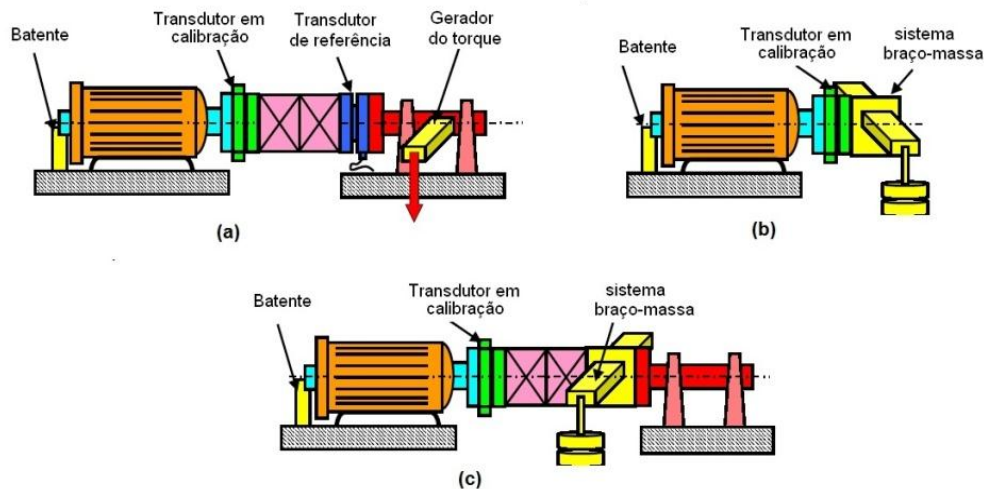


Figura 2.17 - Métodos propostos para a calibração de bancos de testes de motores *in loco*⁷³.

Desta forma, os autores sugerem que os bancos de testes devam ser certificados ou verificados considerando os desvios devido às influências da montagem. Outro ponto destacado é que, pela ausência de um procedimento normalizado para estes testes, o único parâmetro adotado para a estimativa da incerteza é o máximo desvio entre as leituras, muitas vezes realizadas em uma só posição de montagem, o que é insuficiente para aplicações que demandam exatidão no nível de 0,1%, por exemplo. São então enumerados alguns procedimentos preliminares aos testes, no intuito de minimizar a influência na estimativa final da incerteza de medição de alguns parâmetros como cargas parasitárias, adaptação dos transdutores e transmissão assimétrica do torque.

Os autores definem dois métodos para a qualificação dos bancos. O primeiro método consiste no uso de um transdutor de torque, proveniente da calibração em laboratório, como o único membro do sistema de referência. A exatidão e a estimativa da incerteza de medição definitivamente dependem dos desvios entre as condições ambientais e de montagem do laboratório de calibração e do local da aplicação. O segundo método proposto pelos autores é a substituição do transdutor de torque de banco de teste por um transdutor de referência. Assim, o valor de torque calibrado deverá ser aquele gerado pela própria unidade do banco de teste. O transdutor de referência deve ter a mesma geometria e conexões mecânicas do transdutor original do banco.

Wegener e Andrae⁷⁵ introduzem um método para a estimativa da incerteza de medição de torque em bancos de testes de motores levando em consideração os efeitos presentes nestas aplicações dinâmicas. O modelo inclui os parâmetros conhecidos de calibrações em laboratório dos transdutores como histerese, linearidade, interpolação e reprodutibilidade, mas com ênfase nos parâmetros *in loco* dos bancos como temperatura, cargas parasitas e velocidade de rotação. Os autores mostram onde os parâmetros levantados estão atuando, se no transdutor ou no sistema em que está acoplado. Mostram também as fontes para sua obtenção, como *data-sheet*, certificado de calibração, relatório de ensaio ou experiência prática. Alguns efeitos são determinados por propriedades além do transdutor, como o atrito nos rolamentos e o torque requerido para a aceleração dos componentes do eixo devido as suas inércias.

Ao final do artigo, os autores sugerem quatro abordagens para minimização dessas influências nos bancos de teste. Ou seja, a utilização de um transdutor de boa qualidade, uma maior exatidão para determinação das propriedades dos transdutores, como a calibração com base nas normas de calibração, melhores condições para a aplicação, como a utilização dos mesmos acoplamentos que tenham sido usados durante a calibração do sensor e, por fim, melhores conceitos e processos metrológicos aplicados, como pré-cargas para eliminar os efeitos de forças remanescentes e realização de corridas com o eixo desconectado para obtenção dos valores de referência iniciais.

2.5.3 Primeiras propostas para a rastreabilidade dinâmica

Com a evolução dos estudos apresentados até este ponto, foi identificada, por alguns autores, a necessidade de padronizar métodos para a realização do torque sob condições dinâmicas, tanto no que se refere às taxas de variação da grandeza quanto à necessidade de implementação de movimentos aos transdutores.

Fujii *et al*⁷⁶, do National Research Laboratory of Metrology-NRLM, INM do Japão, propõem um sistema para realização do torque de referência através do princípio da transferência de momento angular, sistema mostrado na Figura 2.18. Um volante de inércia com massa e geometria conhecidas é acelerado pelo motor 1 até um patamar de velocidade angular definido. O motor 1 é desligado e desconectado. A embreagem é acionada e existe a transferência do momento

angular do volante para o transdutor. Considerando o sistema com baixo atrito entre o transdutor, a embreagem e o volante, a variação deste momento angular devido à desaceleração do eixo define o equilíbrio de torque do sistema. A transferência desse momento angular ocorre no período imediatamente antes do acionamento da embreagem e imediatamente após esse acionamento.

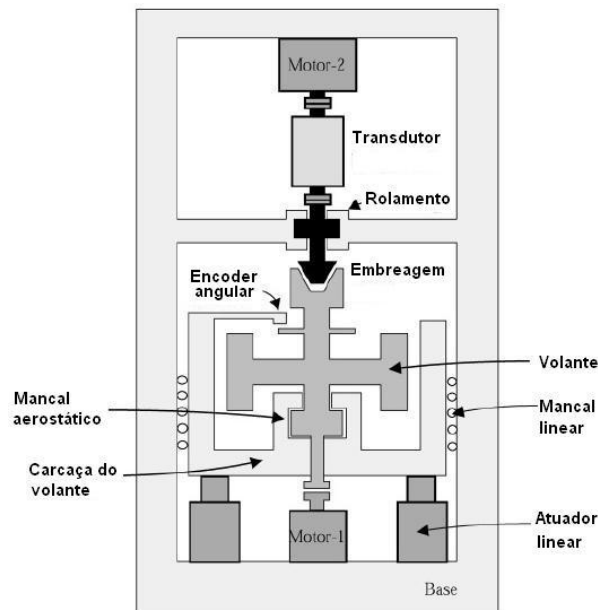


Figura 2.18 - Sistema proposto por⁷⁶ para a verificação da resposta do transdutor à transferência de momento angular.

O projeto é idealizado para um sistema composto por um volante com momento de inércia de massa de $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, mancais aeroestáticos para centralização e apoio dos eixos do volante e da embreagem e um encoder para medição da velocidade angular de referência. Segundo os autores, a uma velocidade angular inicial de $940 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e com a velocidade máxima nominal do mancal, um torque gerado de $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ pode ser mantido por até 47 s, desde o acionamento da embreagem até a completa parada do disco. A incerteza total estimada para o sistema é de 0,1% com contribuições padrão de 0,02% do mancal pneumático, 0,008% do encoder e 0,01% do volante de inércia.

O PTB investiu na pesquisa sobre um sistema de referência para a geração do torque dinâmico e, em 2003, Bruns publicou o artigo "Sinusoidal Torque Calibration: A Design for Traceability in Dynamic Torque Calibration"⁷⁷, atualizado e reapresentado em⁷⁸, com o novo conceito de um sistema para geração senoidal do torque de referência.

A montagem proposta por Bruns, mostrada na Figura 2.19, consiste em um excitador harmônico rotacional montado verticalmente em um dos lados de um transdutor (lado de fixação) e um momento de inércia de valor conhecido acoplado ao outro lado (lado de medição). Este momento de inércia de referência é composto pela porção superior do transdutor (parte mensurável à instrumentação do sensor), por alguns acoplamentos e por um mancal aeroestático para alinhamento do eixo.

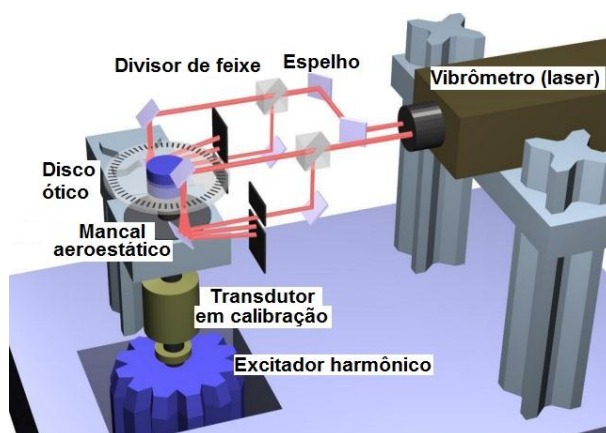


Figura 2.19 - Método proposto por⁷⁷ para a calibração de transdutores de torque pelo método senoidal.

Durante a excitação harmônica, o movimento resulta na aceleração angular do momento de inércia. Ao medir esta aceleração angular com Interferômetro Laser Doppler (LDI) e tendo a referência da quantidade de tempo, é possível determinar o torque aplicado ao transdutor em função do tempo.

Atualmente, este sistema de referência do PTB está em fase de aprovação de conceito e atinge um torque máximo de 20 N·m e frequência de excitação de 1 kHz. No entanto, ainda não existe um valor atribuído de incerteza e um procedimento para a sua utilização como um padrão de calibração na cadeia de rastreabilidade da grandeza torque. O transdutor de torque é um instrumento de segunda ordem e, como tal, apresenta comportamentos característicos de respostas à determinadas solicitações de entrada.

O foco desta pesquisa está sendo dado à determinação das características de rigidez e amortecimento da estrutura mecânica do transdutor e dos demais componentes do sistema^{13; 79}, com a identificação de zonas de ressonância que abrangem uma ampla faixa de frequências.

2.5.4 Oportunidades para Pesquisa

Outras grandezas mecânicas além do torque também apresentam aplicações onde o mensurando tem altas taxas de variação ao longo do tempo mas os respectivos sensores são calibrados apenas estaticamente. A falta de rastreabilidade dinâmica impede que as medições avancem em níveis mais confiáveis de projeto, o que pode gerar consequências para a qualidade, eficiência e até para a segurança das aplicações. Um dos projetos do Programa Europeu de Pesquisa Metrológica (*European Metrology Research Programme - EMRP*) tem o título *Medição Dinâmica Rastreável de Grandezas Mecânicas (Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities - TDMMQ)* e o seu objetivo principal é estabelecer a rastreabilidade dinâmica para as grandezas força, torque e pressão. O projeto, iniciado em 2010, aborda os métodos para a caracterização dinâmica de sistemas de medição, estimativa da incerteza de medição e a utilização de caracterizações nas aplicações industriais¹³.

Como outro exemplo, no congresso mundial da IMEKO de 2012, pela primeira vez o comitê técnico TC3 proporcionou seções exclusivas para a apresentação de trabalhos relativos à metrologia dinâmica das grandezas mecânicas torque, força e pressão²¹. No mesmo ano, o Laboratoire National de Métrologie et D'essais (LNE/França) sediou o 7º workshop em Análise de Medições Dinâmicas¹⁴, que contou com várias mesas redondas com discussões sobre temas relacionados a metrologia dinâmica como novos padrões e novos métodos de cálculo de incertezas de medição, inclusive com apresentações do grupo TDMMQ da EMRP.

O torque tem uma relação direta de evolução a partir dos achados em pesquisas para a grandeza força. As abordagens dinâmicas desta última se antecipa ao torque e já possui algumas discussões mais avançadas e resultados obtidos de sistemas, métodos e normas de calibração já estabelecidos. Um exemplo desse avanço está em⁸⁰ quando o autor apresenta uma revisão dos métodos aplicáveis para padronização dinâmica da força. Segundo este, os objetivos principais da calibração dinâmica em força deve ser a avaliação da resposta do transdutor à variação da força de referência e a avaliação da resposta do transdutor sob aceleração. O autor ainda destaca que, no futuro próximo, os transdutores de força que serão calibrados dinamicamente apresentarão no certificado de calibração as seguintes informações:

- a) resultados das respostas dos transdutores às solicitações de referência como impacto, oscilação ou degrau;
- b) resposta do transdutor sob regimes de aceleração;
- c) correção para as forças inerciais internas do sensor.

No período de 2008 até 2010, o Lafor/Inmetro coordenou o projeto "Desenvolvimento de metodologias para a calibração dinâmica de máquinas para ensaio de implantes ortopédicos"^{81; 82}. Esse projeto proveu à equipe do laboratório um conhecimento introdutório às questões inerentes à rastreabilidade dinâmica da grandeza força e alavancou outras frentes de pesquisa relacionadas.

No período de 2009 até 2011, o Lafor/Inmetro participou do projeto "Fundamentos científicos para a realização e medição de pequenos torques - DEBRATOR", que teve a coordenação do Centro de Treinamento em Tecnologia Industrial e Automação (CTAI), na Universidade Federal da Bahia (UFBA), e da Technischen Universität Ilmenau (TU-ILMENAU), da Alemanha. Este projeto desenvolveu as bases científicas para a construção de um padrão primário para atender às calibrações estáticas de sistemas de medição de pequenos torques, de 0,1 N·m até 1 N·m. Este projeto integrou o programa BRAGECRIM (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura) que tem o objetivo de apoiar e financiar projetos conjuntos de pesquisa entre grupos de pesquisa brasileiros e alemães na área de tecnologia de manufatura avançada^{83; 84}.

Sob esse mesmo programa de cooperação, a UFBA, o INMETRO e a TU-ILMENAU iniciaram em 2012 o projeto "DINTOR – *Fundamentals for the Realization and Measurement of Dynamic Torque*" com o objetivo de explorar e determinar os parâmetros fundamentais no projeto de sistemas de verificação de transdutores dinâmicos de torque. O projeto contempla desde o estudo de novos sistemas até abordagens para o tratamento de dados e metodologias de medição.

A partir das informações apresentadas e discutidas até aqui, o quadro atual de pesquisa na matéria "metrologia dinâmica" confirma o interesse da comunidade científica no desenvolvimento de novos padrões e métodos para a avaliação dinâmica de equipamentos e máquinas. Especificamente, observa-se a necessidade de criação de métodos que padronizem os perfis transientes não cobertos pela atual cadeia de rastreabilidade.

Apesar de ter registrado uma evolução notável das abordagens aplicadas à padronização de torque, de uma forma geral pode-se perceber ainda a falta das principais diretrizes para a caracterização e o estabelecimento de um sistema metrológico dinâmico. Destaque-se a ausência de resultados para:

- caracterização completa dos sistemas propostos;
- cálculo de valores de incertezas de medição;
- cálculo de valores nominais de desvios dos parâmetros avaliados a partir de calibrações realizadas com procedimentos específicos.

Neste ponto é importante ratificar que a nova proposta de padronização deve se posicionar em relação à situação atual como uma cadeia complementar, ou seja, a padronização dinâmica não deve vir substituir aqueles procedimentos tradicionais de calibração, mas sim complementar a caracterização e utilização dos transdutores nas diversas aplicações

Esse conjunto de análises críticas das propostas de calibração já desenvolvidas, junto com a identificação, pelo autor, de um perfil de acionamento capaz de gerar os parâmetros a serem avaliados dinamicamente em um transdutor de torque, na forma primária, formatam e fundamentam a proposta do método de calibração dinâmica que será detalhado nesta tese.

Será demonstrado, dentro da proposta da tese, como o princípio do torque inercial se adapta a uma curva de torque de referência, quantificando assim a abrangência desse método, a partir de uma metodologia de medição definida, do teste e da seleção de componentes reais viáveis para a geração deste tipo de acionamento e dos métodos de obtenção dos parâmetros de calibração.

CAPÍTULO 3

PRINCÍPIO DA CALIBRAÇÃO DINÂMICA

O modelo metrológico que se pretende seguir está relacionado às grandezas medidas no processo e os conhecimentos que contribuem à correta interpretação do mensurando. Este capítulo apresenta de que forma o princípio físico a ser abordado deve ser adaptado para que funcione como a ferramenta principal na geração do torque de referência. No modelo metrológico básico agrega-se já alguns conceitos da metodologia de medição, ou seja, uma introdução ao que deverá ser o procedimento de medição incorporado em uma metodologia de calibração.

De forma a ilustrar essa condição, a Figura 3.1 mostra a nova proposta para a rastreabilidade, baseada em duas pirâmides, integradas no último nível.

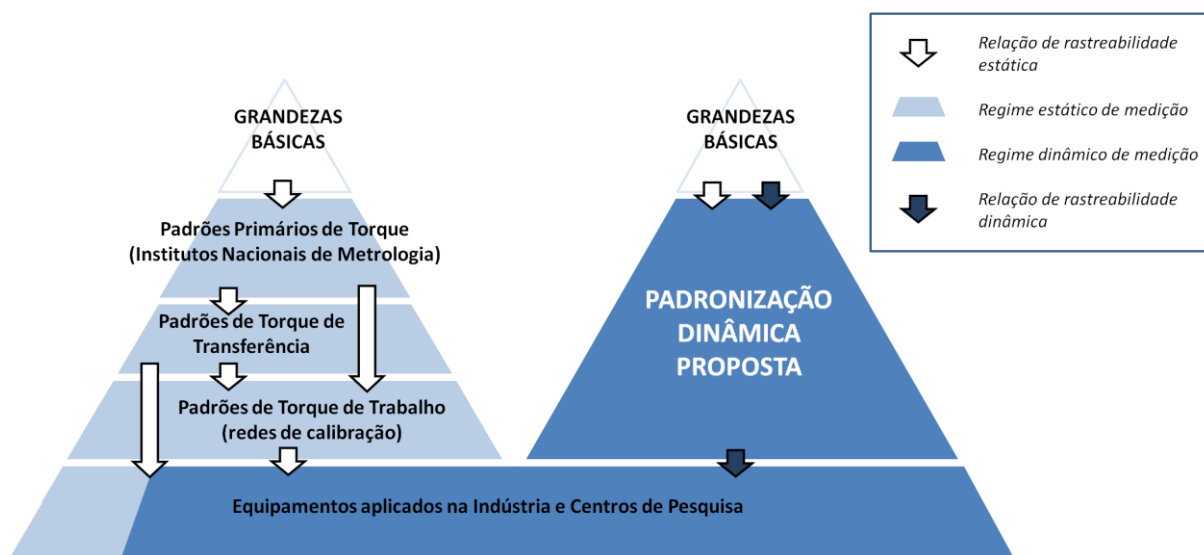


Figura 3.1 - Rastreabilidade do torque, incluindo a pirâmide proposta para a padronização dinâmica.

Por se tratar de uma proposta inédita, que inclui ambas as abordagens de método e sistema, a nova pirâmide apresenta um nível único de padronização entre as grandezas básicas e o usuário final das aplicações dinâmicas, último nível na

base da pirâmide. De formatação diferente, a pirâmide de rastreabilidade estática, que já possui sistemas e procedimentos bem estabelecidos internacionalmente e uma boa diversidade de equipamentos, possibilita a padronização em vários níveis definidos de qualidade, abrangendo desde as grandezas básicas até a base da pirâmide. Somente a partir da inserção da proposta no quadro da grandeza, um passo seguinte aos atingidos nessa tese, é que será possível um detalhamento e subdivisão em níveis intermediários da pirâmide de rastreabilidade dinâmica, distinguindo-se pelos níveis de confiabilidade metrológica alcançáveis. Na proposta de inclusão da rastreabilidade dinâmica, o último nível é comum às duas pirâmides, pois os resultados da calibração dinâmica complementarão os resultados das relações de rastreabilidade estática que também alcançam este último nível.

As perguntas cruciais que esta pesquisa pretende responder daqui em diante, para a fundamentação da proposta do novo método candidato à padronização, são:

- *Quais são os parâmetros dos transdutores a serem avaliados dinamicamente?*
- *Qual o princípio físico a ser proposto/selecionado para a geração de um torque de referência dinâmico?*
- *O perfil de carregamento a ser proposto permite um regime transiente rastreado e capaz de gerar as respostas desejadas do transdutor para avaliação destes parâmetros?*
- *Quais seriam as metodologias de medição e carregamento adequadas?*
- *Quais as restrições do perfil de acionamento?*
- *Quais os elementos físicos básicos (equipamentos e instrumentos) necessários para a realização do método proposto? Existe um setup preferível para compor o sistema mecânico com uma melhor capacidade de medição?*
- *Quais os níveis alcançáveis para a incerteza de medição? Quais as principais contribuições a serem consideradas?*

A seguir estão alguns argumentos desta primeira etapa da pesquisa com uma nova abordagem de calibração mostrando em quais fundamentos esse trabalho deve se basear, além de como serão respondidas as perguntas acima.

3.1 O escopo da calibração dinâmica

As informações apresentadas no Capítulo 2 mostram a susceptibilidade dos sensores aos diferentes valores de velocidade angular foi evidenciada nas pesquisas que abordaram testes onde o transdutor é acionado à velocidade constante e o torque aplicado em patamares também constantes em vazio (torque nulo) e em torques de frenagem (resistivos). Estes resultados tiveram aplicabilidade direta na metodologia de caracterização de bancos de teste de motores, onde as velocidades e os torque são constantes. Porém, essa abordagem é limitada ou insuficiente sob o ponto de vista da rastreabilidade dinâmica uma vez que a calibração do transdutor considerado como referência se mantém estática.

Além das condições cinemáticas dos transdutores, foi identificado também que taxas de torque presentes nestas aplicações dinâmicas podem chegar a $200 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

As Normas de calibração de transdutores de torque vigentes apresentam métodos puramente estáticos onde a taxa de torque é nula e não há rotação. No entanto, os testes de *creep*, estabelecidos por estas mesmas Normas, identificam e quantificam uma dependência temporal dos sinais destes sensores durante seu relaxamento de carga.

Nas pesquisas para a caracterização e validação do método contínuo de calibração foi identificado que em condições cujas medições realizadas tinham altas taxas de variação do torque, com valores acima de $15 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, os transdutores em teste apresentaram desvios muito grandes de sensibilidade nominal, além de altos valores de *creep* e de erro de reversibilidade, o que inviabilizou a utilização deste método de calibração para estas condições de carregamento. Para baixas taxas de variação do torque, o método contínuo apresentou resultados satisfatórios em relação àqueles obtidos originalmente das calibrações puramente estáticas.

A existência de altas taxas de variação do torque é o principal parâmetro que caracteriza os regimes transientes e, portanto, estes estão descobertos pelos métodos de calibração atualmente validados e caracterizados.

Para cobrir o regime transiente, o método de ensaio dinâmico a ser proposto deve ocorrer durante toda a série de aplicação do torque e não somente em pontos

específicos estabilizados do carregamento, como acontece no método puramente estático e no método contínuo.

Utilizando como referência os parâmetros dos transdutores levantados pelas Normas de calibração estática e baseando-se nos resultados das pesquisas apresentadas nesta revisão, o perfil de acionamento do torque de referência deve priorizar a aplicação de altas taxas de variação do mensurando e deve ser capaz de provocar as respostas dinâmicas do transdutor, além de avaliá-las quanto:

- ✓ Aos desvios entre os valores lidos no transdutor em calibração e aqueles gerados na referência. As curvas de calibração obtidas estaticamente para determinação da sensibilidade nominal do transdutor devem ser mantidas, e as leituras do transdutor realizadas durante o acionamento dinâmico serão obtidas diretamente em unidades de torque, bem como o seu desvio em relação ao torque dinâmico de referência;
- ✓ À histerese do sensor entre as regiões do carregamento com taxas crescentes e as regiões com taxas decrescente na variação do torque que correspondam aos mesmos valores da faixa de torque em medição;
- ✓ Ao comportamento na região de torque nulo;
- ✓ À reprodutibilidade desses parâmetros em carregamentos sequenciais sob condições análogas de acionamento, o que inclui componentes mecânicos e características cinemáticas;
- ✓ À susceptibilidade das medições de torque a diferentes condições de velocidade e aceleração angulares, o que gera diferentes conjuntos de taxas de variação do torque.

A Figura 2.11 mostra, de forma simplificada, séries de carregamentos utilizadas no método de calibração estático de um transdutor. Esses perfis de acionamento são interessantes sob o aspecto prático e servem à adaptação para a aplicação dinâmica, como uma proposta de princípio semelhante encontrada nos testes de transdutores de força pelo método de impacto. Um perfil de torque teórico de referência a se aplicar se assemelharia então ao gráfico da Figura 3.2. Este perfil de torque no domínio do tempo permite a avaliação das características dinâmicas propostas para a calibração dos transdutores.

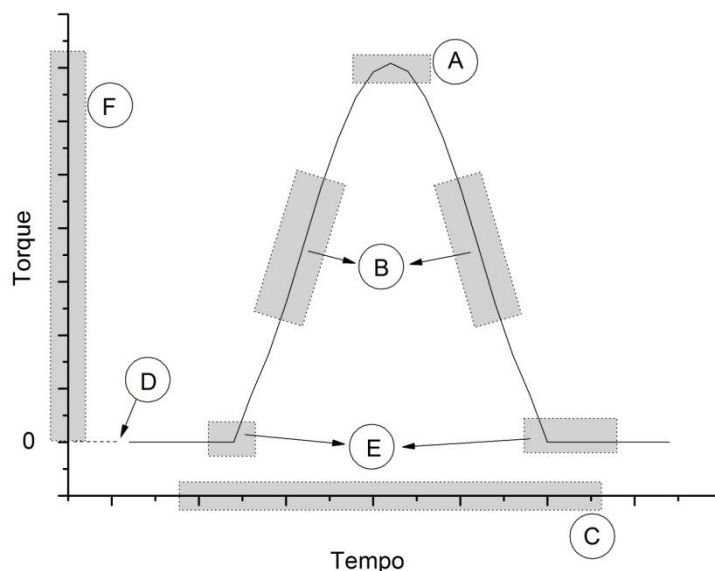


Figura 3.2 - Curva característica do torque de referência a ser gerada.

As regiões e características identificadas na figura são os parâmetros funcionais e de avaliação disponíveis nessa configuração de carregamento e são descritas a seguir:

- (A) Na região de pico do torque, o torque máximo da curva serve como ponto de avaliação representativa da curva, ou seja, o pico pode ser tomado como o valor único na medição e ser comparado a outros picos obtidos de acionamento consecutivos, numa avaliação de reprodutibilidade, por exemplo. Em uma série de acionamentos é possível determinar a repetibilidade ou reprodutibilidade na determinação desses valores máximos de torque e realizar a comparação entre os picos medidos no transdutor e os picos de referência, avaliando um desvio na sensibilidade nominal do transdutor.
- (B) As regiões de inflexão correspondem aos maiores valores de taxas de crescimento ou diminuição do torque. Essas regiões caracterizam o regime como altamente dinâmico uma vez que a rastreabilidade também é dada nelas. Essas taxas de torque correspondem à primeira derivada do sinal de torque. A Figura 3.3 mostra um exemplo de como esse parâmetro deverá ser abordado na metodologia de medição e teste do sensor. Diferenças entre os valores de taxas crescente e decrescente pode caracterizar uma histerese mecânica do sensor ou dispositivo em

teste. No pico de torque, a taxa é zero, o que pode conferir uma região de maior estabilidade à leitura naquele ponto.

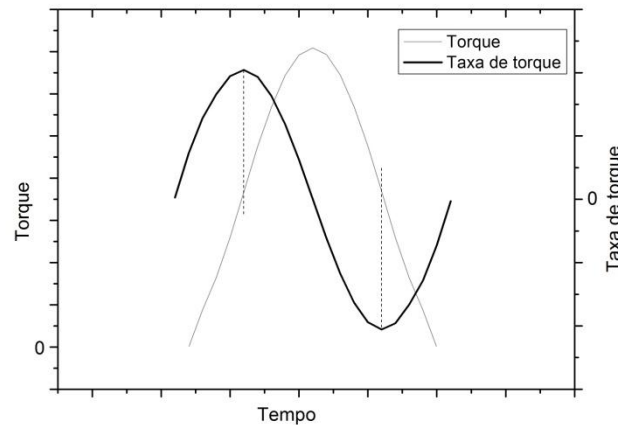


Figura 3.3 - Curva característica das taxas de torque (pico para a máxima taxa crescente e vale para a máxima taxa decrescente).

- (C) Período de aplicação da curva - o intervalo de tempo na aplicação do torque, assim como as taxas de torque, define o quão dinâmico o regime proposto está sendo realizado. A relação entre o intervalo de tempo e o pico de torque será ao mesmo tempo um requisito e uma restrição do sistema, pois definirá os limites de atuação dos equipamentos da montagem quanto às suas capacidades dinâmicas.
- (D) Base da curva em torque zero - o regime de torque proposto avalia os pulsos de torque se iniciando e retornando a zero, pois desta forma pode-se avaliar o comportamento do sensor à solicitação partindo de um referencial comum.
- (E) Nessa região pode ser calculado também o desvio de zero, considerando o valor de zero inicial e o valor de zero final ou de relaxamento, dependendo das características de estabilidade e controle do acionamento de torque.
- (F) Toda faixa de medição está rastreada - importante parâmetro pois garante rastreabilidade - em todos os pontos da curva de carregamento, possibilitando ao usuário avaliar, além dos trechos destacados como importantes da curva, qualquer outra região de interesse para a análise do sensor sob as taxas de variação da grandeza.

Quanto à forma de realização do torque de referência, este deve corresponder ao esforço torcional gerado e aplicado diretamente ao eixo de medição. Ou seja, deve ser uma padronização primária e não um valor reproduzido por outro transdutor de referência que esteja sendo acionado por um gerador de esforço torcional qualquer, como é feito nos métodos secundários de calibração por comparação e no método contínuo.

Em referência à calibração estática, o princípio para a geração do torque primário de referência é através do produto das grandezas básicas massa, aceleração e comprimento (braço de alavanca), que constitui o estado da arte para esses padrões. Para o torque dinâmico, o princípio físico é baseado na Segunda Lei de Newton aplicada à rotação, que constitui na geração do torque primário de referência pelo produto de um momento de inércia de massa conhecido e da aceleração angular aplicada a este. Este método, aqui denominado de torque inercial de referência, pode ser considerado como o mais promissor para a geração de um torque de referência que possa ser disseminado diretamente na cadeia da grandeza, tanto que, como já foi mencionado anteriormente, este foi adotado pelo NRLM⁷⁶ e pelo PTB^{77; 79} em suas abordagens para calibração dinâmica de transdutores.

No entanto, com respeito à essas duas abordagens pode-se realizar algumas ponderações sobre suas limitações para a realização do torque de referência dentro do perfil proposto na Figura 3.2:

- A proposta do NRLM mostra o torque de referência gerado pela variação do momento angular de um volante de inércia através de sua desaceleração constante. No entanto, se a desaceleração não se comporta de forma constante, como prevê o autor, o operador não terá controle desta desaceleração, não permitindo, portanto aplicação de diferentes solicitações de aceleração. O acoplamento entre o transdutor e o volante de inércia é realizado por uma embreagem, a qual além de contribuir com um valor inercial para o momento de referência, não transmite o torque de forma constante em todo o percurso do disco^{85 [1]}.

¹ Foi realizado um contato com o autor do único artigo que descreve a proposta, questionando a respeito de resultados experimentais neste sistema e o mesmo informou que não houve a montagem da máquina. Os dados apresentados para incerteza de medição idealizados e calculados apenas a partir do modelo teórico.

- A proposta do PTB apresenta o torque de referência como uma solicitação harmônica, onde busca avaliar as respostas do transdutor no domínio da frequência, considerando-o um sistema de medição de segunda ordem, mas não avalia as curvas individuais de acionamento durante sua aplicação, ou seja, os dados extraídos são médias de amplitudes de picos e vales de torque medidas nas oscilações e não o transiente do torque em determinado e específico período de tempo. O momento de inércia de massa considerado como referência é constante e a variação dos valores de amplitude de torque dependerá somente da frequência de acionamento, não existindo, portanto a possibilidade de acoplar outros corpos inerciais ao conjunto e avaliar outros pares de inércia e aceleração para o conjunto. No histórico de revisão desta proposta, composto de vários artigos e relatórios de projetos, ainda não são apresentados resultados de medição que conduzam a uma conclusão prática sobre a viabilidade, abrangência e desempenho reais do sistema.

3.2 O princípio físico de referência

Para realizar o torque de referência dinâmico que seja rastreável diretamente às grandezas principais de medição, ou seja, na sua forma primária, sem a necessidade de outro sensor que reproduza a grandeza como referência, a Equação 2 que descreve o princípio físico do torque inercial gerado em um corpo com aceleração angular deve ser aplicada:

$$T_{inr} = \theta \cdot \alpha \quad (2)$$

Onde:

T_{inr}	Torque inercial
θ	Momento de inércia de massa do corpo
α	Aceleração angular

O momento de inércia de massa de um corpo é uma medida da resistência deste corpo à sua rotação. O momento de inércia de massa depende não somente

da massa em si mas também da distribuição desta massa em torno do centro de rotação da peça.

Esta configuração propõe a realização do torque de referência a partir da aplicação do transdutor em calibração em um eixo girante de momento de inércia conhecido e com a velocidade angular controlável, podendo ser alterada para produzir uma aceleração a este eixo, quando aplicada no sentido da rotação, ou desaceleração se aplicada para a diminuição dessa velocidade (frenagem). O diagrama da Figura 3.4 mostra, de forma simplificada, a ordem desses atores, com o acionamento do eixo sendo realizado a montante do transdutor e dos corpos de inércia de referência e a medição da aceleração angular sendo feita a jusante do transdutor em teste.

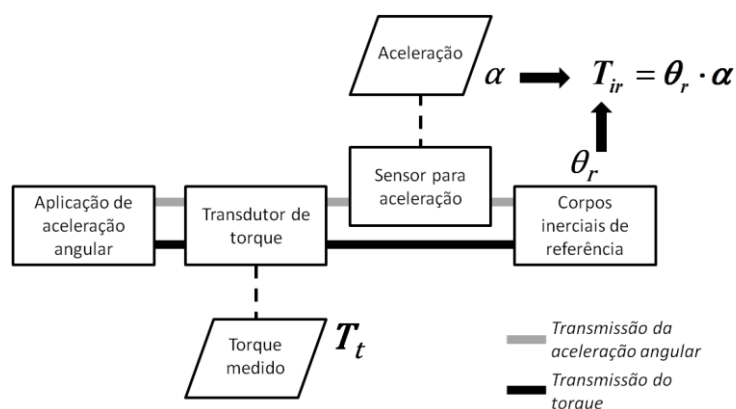


Figura 3.4 - Diagrama básico da realização do princípio.

O torque líquido medido no transdutor (T_{tl}) deverá ser comparado ao torque inercial de referência (T_{ir}), gerado pelo produto entre a aceleração angular de referência (α_r) e o momento de inércia de massa de referência (θ_r) de corpos acoplados ao eixo.

Entendendo que a geração do torque inercial só é possível pela aceleração resultante do acionamento dinâmico do eixo de medição, é necessário traduzir essas solicitações mecânicas de torque em solicitações cinemáticas de aceleração e velocidade angulares. Tomando mais uma vez como referência a Equação 2 e o fato do momento de inércia de massa permanecer constante durante o acionamento, o perfil da curva de aceleração será proporcional à curva de torque.

Considerando a curva da Figura 3.2 como uma referência, pode-se ilustrativamente aproximá-la a uma curva hipotética equivalente a meio período da função seno, incluindo um pico, como descrita na Figura 3.5.a.

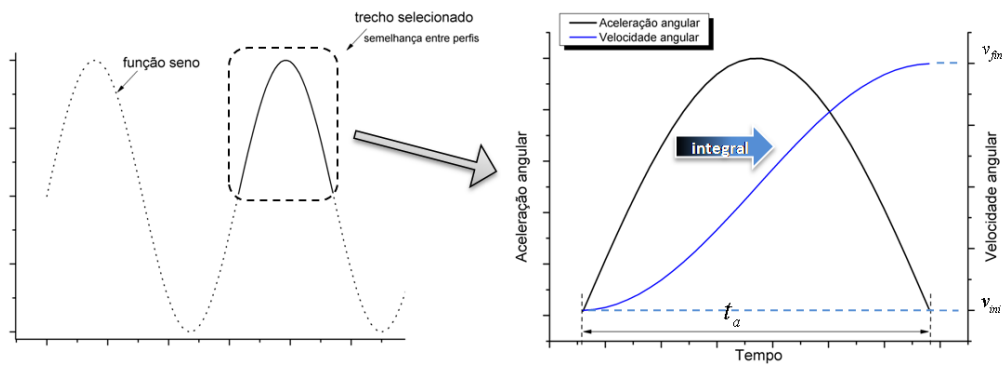


Figura 3.5 - (a) Trecho da senóide semelhante ao perfil de torque desejado; (b) Curva de aceleração proporcional ao torque e rampa de velocidade angular obtida da integração.

Embora a caracterização do sistema esteja baseada nas grandezas torque e aceleração, o acionamento de eixos girantes é mais comumente realizado e apresentado através do controle da grandeza velocidade angular. Portanto, a integração numérica da curva de aceleração teórica proposta define o referido perfil para a variação da velocidade angular. O resultado é uma rampa de aceleração entre dois patamares de velocidades angulares constantes, conforme pode ser visto na Figura 3.5.b. Tomando os eixos verticais da figura como aceleração e velocidade, podemos exemplificar o acionamento considerando que o eixo encontra-se em rotação com velocidade angular constante v_{ini} e então é acelerado para um outro patamar de velocidade constante v_{fin} , num intervalo total denominado tempo de aceleração (t_a) no eixo horizontal do tempo. Este perfil de velocidade passa então a configurar um regime promissor a ser buscado na pesquisa.

Importante destacar que, embora o termo aceleração esteja sendo utilizado mais amplamente no texto, a desaceleração, ou frenagem, poderá ser realizada sob os mesmos princípios e características. Ou seja, o acionamento do eixo feito no sentido da rotação, independente deste ser horário ou anti-horário, aplica o torque em favor do sentido de rotação (aceleração) ou o torque contra o sentido de rotação (desaceleração), como num acionamento de v_{fin} para v_{ini} . De uma forma geral, o acionamento deverá cobrir ambos os sentidos de rotação, permitindo o teste do transdutor nos sentidos horário e anti-horário e os comandos de acionamento deverão permitir a aplicação de diferentes curvas de velocidade e aceleração.

A proposta de sistema apresentada nesta tese se baseia no diagrama da Figura 3.4 para seu funcionamento, onde existe, o acionador, o transdutor de torque em teste, o sensor para a aceleração ou velocidade e os corpos de inércia. Dessa

forma, a Figura 3.6 mostra um esboço de uma montagem que traz esses componentes principais. Importante destacar que essa é uma configuração teórica, tratada de forma simples com o intuito de mostrar didaticamente como devem ser considerados os elementos de torque principais que venham compor o eixo de acionamento e medição do projeto final do sistema, na metodologia de medição. A partir desse esboço, pôde-se desenvolver os fundamentos que determinarão os requisitos que um sistema real deva ter para se aproximar da realização ideal do princípio físico expresso na Equação 2 e na Figura 3.4.

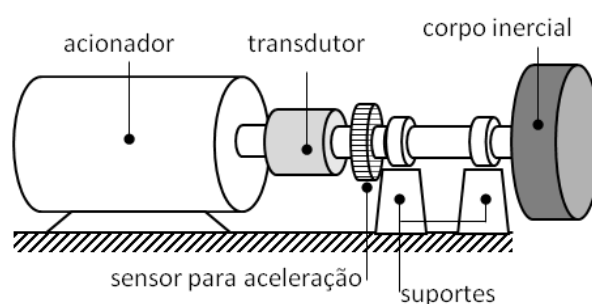


Figura 3.6 - Esboço do sistema de calibração com os componentes elementares propostos para realização do princípio físico de referência.

Considerando que o torque inercial gerado é uma combinação entre um valor de momento de inércia de massa e um perfil de aceleração, dependendo da forma em que se trabalhe essas duas variáveis, um mesmo corpo inercial poderá ser submetido a diferentes curvas de aceleração e gerar valores diferentes de torque.

Definidos os requisitos no carregamento de torque, o princípio físico e os parâmetros das curvas de acionamento, o modelo básico para a metodologia de medição deve ser determinado.

O valor lido no transdutor na unidade de torque é obtido da curva de interpolação original do certificado de calibração estática do transdutor, ou seja, a sensibilidade nominal ou razão entre a variação da tensão elétrica na ponte extensométrica do sensor e a variação na unidade mecânica de torque se mantém referenciada aos resultados da calibração estática. Com isso, a comparação entre as curvas é na verdade a validação de um referencial estático contra um referencial dinâmico dentro de um mesmo sistema dinâmico.

No eixo de medição existem outros componentes de torque que não somente aquele que se pretende utilizar como referência ao transdutor, no caso, o torque inercial de referência. Pode-se tomar como exemplo a montagem simplificada da

Figura 3.6, onde os elementos mecânicos geram componentes parasitas inerciais e não inerciais ao sistema, ou seja, interferências indesejáveis de forças e torques, originadas de atritos, desalinhamentos e desbalanceamentos. Uma introdução à interferência dessas chamadas cargas de torque não inerciais (τ_{car}) é apresentada mais adiante, no capítulo 4.2, mas por enquanto, serão consideradas desprezíveis para um melhor entendimento da metodologia de medição proposta e serão considerados somente os torques inerciais (τ_{inr}) presentes no eixo.

A Figura 3.7 mostra como esses esforços torcionais aparecem em cada componente e como o princípio de medição deve ser aplicado na avaliação do trecho do eixo em equilíbrio de medição.

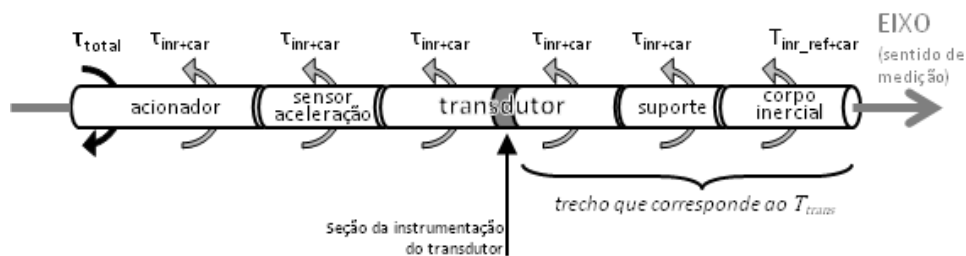


Figura 3.7 - Equilíbrio no eixo de transmissão e medição do torque
(τ_{inr} = torques inerciais; τ_{car} = torques de carga).

O elemento do transdutor de torque pode ser compreendido em duas partes, uma a montante da seção instrumentada do transdutor e outra a jusante desta. Os torques presentes no eixo e que estiverem a montante da seção instrumentada, isto é, à sua esquerda na figura, não serão medidos por este sensor. Já os torques presentes à direita da seção instrumentada do sensor irão compor o torque inercial a ser medido.

Isso permite que no trecho entre o acionador e o transdutor exista uma liberdade maior para a implementação de acoplamentos e conectores que auxiliem o alinhamento ou o amortecimento de vibrações. O acionador deve suportar o torque total no eixo.

O momento de inércia de massa total do eixo (θ_t) pode ser dividido em duas partes: o momento de inércia de massa de referência (θ_r), que corresponde aos corpos inerciais de referência, e o momento de inércia de massa inicial (θ_i), que corresponde aos demais componentes do eixo e será constante durante os acionamentos da calibração. Esse momento de inércia inicial inclui os acoplamentos, discos conectores, eixos de extensão e os próprios momentos de inércia de massa

do transdutor e do sensor de aceleração. Estes são denominados de momento de inércia de massa inicial pois, como será mostrado a seguir, gerará o primeiro torque referencial a ser medido no início das séries de carregamento antes de se acoplar θ_r , que é um componente projetado e fabricado sob condições ótimas e calibrados em sua geometria e massa.

Este momento de inércia de massa inicial poderá também ser dividido em duas partes. A primeira parte (θ_{i1}) corresponde às inércias dos componentes a montante da seção instrumentada do transdutor e, como já foi explicado anteriormente, contribui apenas para o cálculo das capacidades e restrições de aceleração por parte do acionador, mas não é medida pelo sensor.

Por outro lado, o momento de inércia da massa a jusante da seção instrumentada (θ_{i2}) participa em todas as medições de torque e estará também conectado constantemente ao transdutor.

Embora o momento de inércia inicial possa ser estimado a partir de especificação técnica e dados dos fabricantes dos equipamentos e instrumentos envolvidos, ou até mesmo através de métodos computacionais de cálculo durante o projeto mecânico de eixos de extensão e acoplamentos, esse valor de inércia não é metrologicamente rastreável e não é, portanto confiável ao ponto de poder ser utilizado como referência inicial para o cálculo de um torque inercial de referência. Assim, em uma montagem inicial sem os corpos inerciais de referência, um primeiro passo da metodologia de medição deve tomar o torque medido inicial (T_{ti}) como um valor de tara e o correspondente torque inercial inicial (T_{ii}) não precisará ser calculado (Equação 3).

$$T_{ti} \Leftrightarrow T_{ii} \quad (3)$$

A ordem de grandeza desse torque inicial deve ser avaliada de forma que seja bem menor que os valores de torque que se pretende avaliar durante o acionamento.

Num segundo momento, o corpo inercial de referência deverá ser acoplado e o regime de acionamento repetido, sob as mesmas características anteriores, quando novos valores de torque (T_t) poderão ser medidos pelo transdutor, conforme Equação 4.

$$T_t \Leftrightarrow T_{ii} + T_{ir} \quad (4)$$

Este torque T_t medido inclui a contribuição de T_{ii} que deverá ser debitada para a obtenção do valor de torque medido líquido (T_{tl}). Este torque medido líquido corresponderá, portanto ao torque inercial de referência (T_{irr_ref}) gerado apenas pelo corpo inercial de referência. A Equação 5 demonstra essa relação.

$$T_{tl} = T_t - T_{ii} \therefore T_{tl} \Leftrightarrow T_{ir} \quad (5)$$

O esquema da Figura 3.8 ilustra a metodologia a ser incorporada ao sistema para a realização do método.

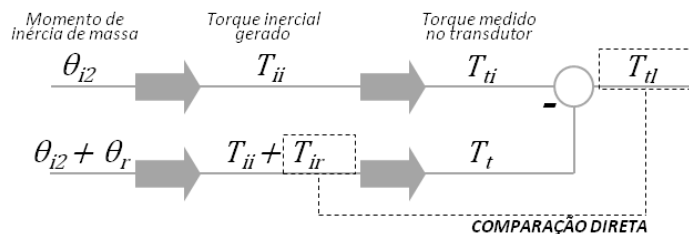


Figura 3.8 - Metodologia de medição para obtenção do torque medido líquido (T_{tl}).

Na primeira linha da figura é realizado o acionamento sem o corpo inercial de referência, ou seja, somente θ_{i2} está no trecho mensurável do eixo. Na segunda linha o eixo é acionado com o corpo inercial de referência acoplado. A diferença entre os dois torques medidos apresentará o torque medido líquido T_{tl} , que deverá ser comparado ao torque inercial de referência T_{ir} .

Esse é o princípio básico para a geração da referência e para a comparação direta entre os valores de torque. A seguir serão abordadas as formas de inclusão desse conceito básico sobre uma metodologia mais detalhada, com sequências de carregamento e interpretação de dados medidos, objetivando o estudo metrológico dos sensores.

3.3 Proposta de sequências para as medições

Como um dos objetivos da tese é constituir um procedimento de verificação do torque dinâmico, a definição e o estudo de uma sequência de medição adequada

serão importantes para este fim. Os pontos a seguir apresentam alguns comentários a respeito de uma proposta para a sequência de operação, demonstrada na Figura 3.9, com as funções principais para a realização das medições e algumas observações a respeito desses passos.

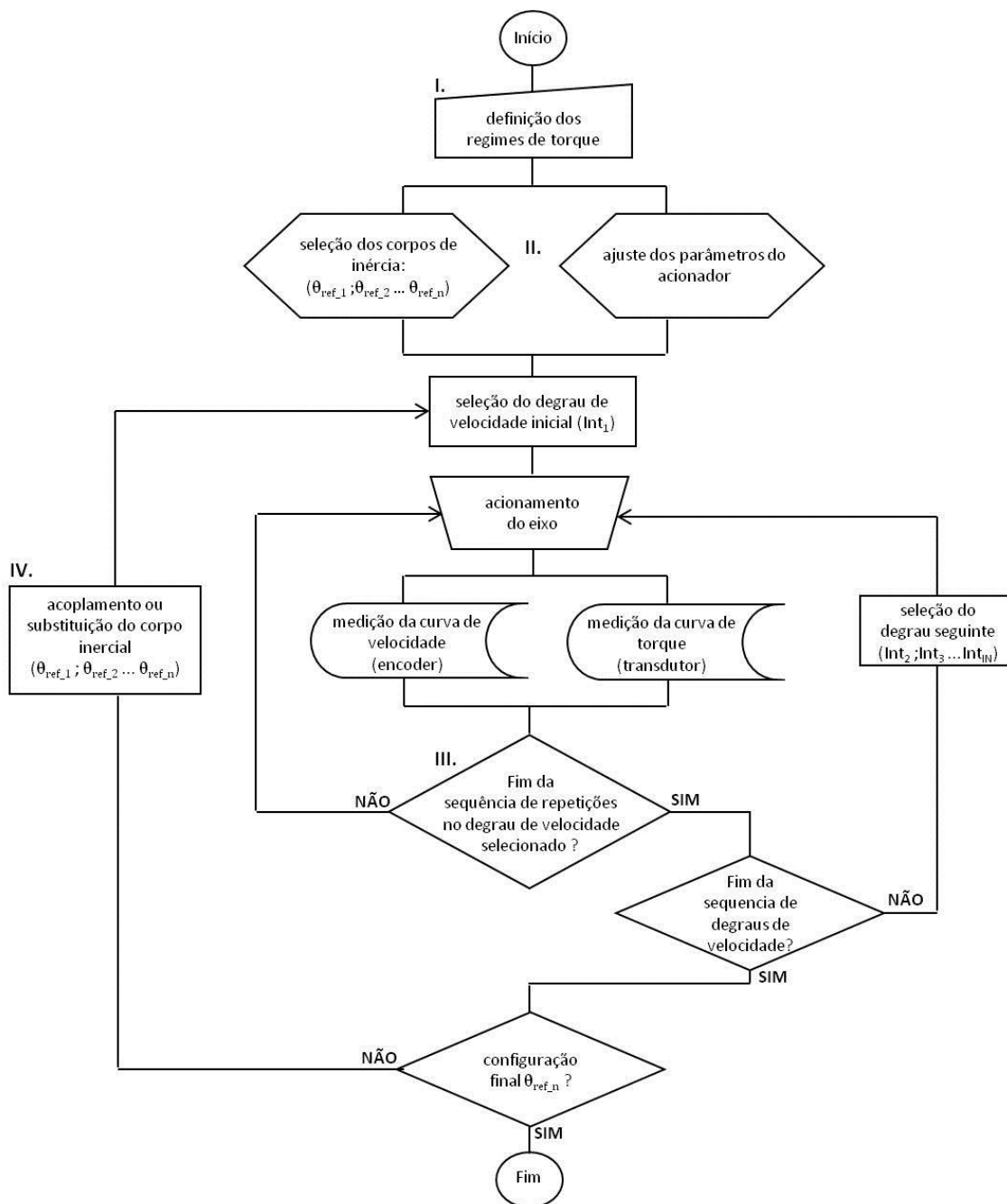


Figura 3.9 - Fluxograma com a sequência de operação do sistema de calibração variando parâmetros de acionamento

- I. *Definir as faixas de torque dos transdutores* - Primeira etapa que define os valores de torque a serem avaliados na faixa nominal do transdutor em combinação aos valores dinâmicos ajustáveis de aceleração e velocidade

no acionador e aos valores de momentos de inércia dos corpos inerciais disponíveis. A combinação desses ajustes define as taxas de variação de torque a serem aplicadas.

- II. *Ajustar o acionador e selecionar os corpos inerciais* - Seleciona os corpos inerciais que podem atingir ao torque pretendido e define, baseado nesta seleção, os parâmetros de acionamento como os degraus de velocidade e os tempos de aceleração e desaceleração. São duas ações simultâneas e interdependentes. Diferentes regimes de torque podem ser atingidos variando-se o corpo inercial e mantendo as mesmas características de acionamento do eixo. De forma complementar, a faixa de valores de torque que se pretende alcançar abranja diferentes combinações de aceleração e momentos de inércia de massa. Assim, é possível realizar o mesmo valor de torque inercial de referência sob diferentes regimes de acionamento.
- III. *Definir séries de acionamentos* - Para maior praticidade operacional, com um mesmo momento de inércia no eixo de medição deve-se aplicar os diferentes acionamentos ajustados. A Figura 3.10 demonstra como exemplo dois degraus de velocidade diferentes sendo aplicados em sequência, no caso, três vezes o degrau Int_1 , com intervalo de velocidade de v_0 até v_1 e em seguida três vezes o intervalo Int_2 , com velocidades de v_1 até v_2 . Isso deve ser repetido para todos os intervalos e degraus estabelecidos na ação anterior até o último intervalo Int_{IN} . O acionamento em várias rampas consecutivas traz mais confiabilidade metrológica à medição no sentido de garantir a avaliação da repetitividade das leituras.
- IV. *Alterar a inércia de referência* - Os corpos inerciais são peças físicas, de valores de momento de inércia constantes que não permitem pequenos ajustes. A variação dessa inércia de referência poderá então ocorrer de duas formas: a) com a substituição da peça anterior ou; b) com o acréscimo de uma peça à montagem acionada anteriormente. Ambas tem prós e contras, o que deverá ser abordado mais adiante. A Figura 3.10.b mostra as diferentes curvas de torque geradas para aqueles intervalos do exemplo da Figura 3.10.a quando mantidas as características de acionamento.

- V. Repetir o acionamento de rampas de velocidade quantas forem determinadas para cobrir uma faixa de velocidade (degraus) e aceleração (torque).

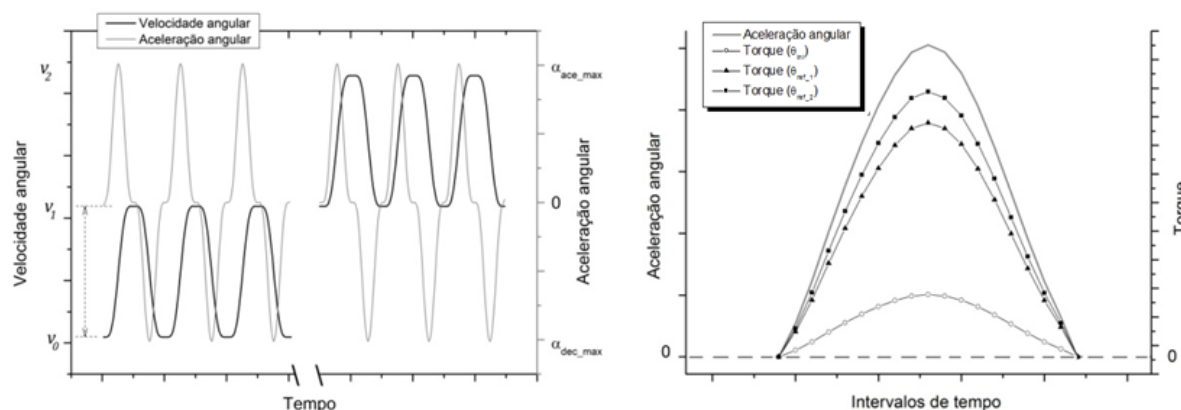


Figura 3.10 - (a) Sequência de acionamentos em diferentes intervalos de velocidades; (b) Valores de torque para uma mesma configuração de acionamento, mesmo perfil de aceleração ajustadas para uma mesma base de tempo (sincronização).

A sequência de acionamento cobrindo os degraus de velocidade pré-estabelecidos devem ser repetidas para cada corpo inercial acoplado, incluindo a configuração inicial com somente θ_i .

A curva de torque medida no transdutor e a curva calculada da geração inercial do torque são simultâneas e, diferentemente das medições estáticas, a dependência temporal dos valores em um regime dinâmico é muito forte. Portanto estes valores devem ser indexados de forma que identifiquem o período ou instante de acionamento em que acontecem. A identificação básica e individual dos dados se dá pela indexação no tempo, de forma que $T_{ir}(i)$ e $T_{tl}(i)$ correspondam respectivamente aos valores de torque inercial de referência e torque líquido medido no transdutor no instante de tempo i . Cada instante de tempo apresentará um valor de erro de medição $E(i)$ obtido da diferença entre o valor de torque de referência e o valor de torque medido (Equação 6).

$$E(i) = T_{tl}(i) - T_{ir}(i) \quad (6)$$

O erro de medição será o parâmetro fundamental para a calibração pois, além de mostrar de forma direta uma característica dos transdutores, dependendo de como é combinado com outros fatores do acionamento, podem ser interpretados

como caracterizadores de outros parâmetros do sensor. Para este tipo de análise é que são realizadas sequências de séries de medições que estarão sob as mesmas configurações de acionamento, o que requer uma indexação mais específica para identificação destes períodos de medição e dos conjuntos de dados.

Dentro dos objetivos da avaliação dos comportamentos dinâmicos dos transdutores em calibração, os parâmetros variáveis das configurações de carregamento podem ser:

- O corpo inercial de referência acoplado ao eixo.
- O intervalo de velocidades angulares.
- O tempo de aceleração nominal, que define as taxas de variação.
- O sentido de aplicação da velocidade, que define o sentido do torque de aceleração.
- O sentido de aplicação do torque em relação ao movimento do eixo, ou seja, se é um torque a favor do movimento (aceleração) ou se é um torque contra o movimento (frenagem ou desaceleração).

Cada conjunto de acionamentos equivalentes, aqueles com mesmos fatores de configuração, deve ser identificado de forma que os valores de torque sejam manipulados com praticidade e confiabilidade metrológica. Assim, a avaliação dos acionamentos por blocos se mostra de uma forma efetiva na identificação destes conjuntos. Como no exemplo de acionamentos em série da Figura 3.10, a Figura 3.11 também mostra três séries de carregamento distribuídas ao longo do período de medição, incluindo os comportamentos de aceleração e desaceleração, t_a e t_d respectivamente. Neste exemplo, t_a é diferente de t_d . Os acionamentos são realizados entre os patamares de velocidade v_0 e v_1 , com o mesmo tempo de aceleração nominal. Pretende-se com isso, avaliar a interferência da variação do intervalo de velocidade em ambos os sentidos de aplicação do torque. Como as curvas de torque e as curvas de aceleração são semelhantes em seus perfis, nesta figura estão traçados somente os comportamentos teóricos de velocidade e aceleração, suficientes para identificar os acionamentos.

Os blocos de acionamento devem ser recortados da linha de tempo contínua e então agregados em uma indexação relativa para cada bloco, de forma que identifique para cada série a sequência de valores de torque que se reproduza nas

demais séries do mesmo bloco. A Figura 3.12 mostra como exemplo as séries de acionamento recortadas da linha de tempo contínua da Figura 3.11, transformadas em torque e com foco nos trechos mais acentuados das curvas, para uma linha de indexação sequencial (j) baseada na distribuição de valores de torque para o bloco em análise num total de J pontos.

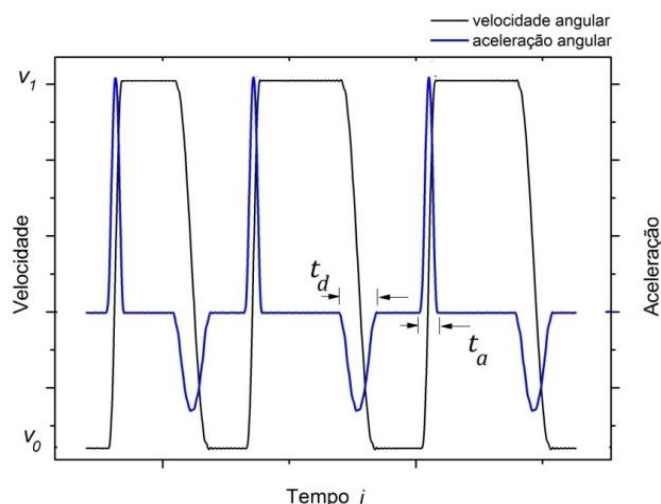


Figura 3.11 - Rampas de acionamento sob uma mesma configuração e indexação no tempo total do conjunto de séries.

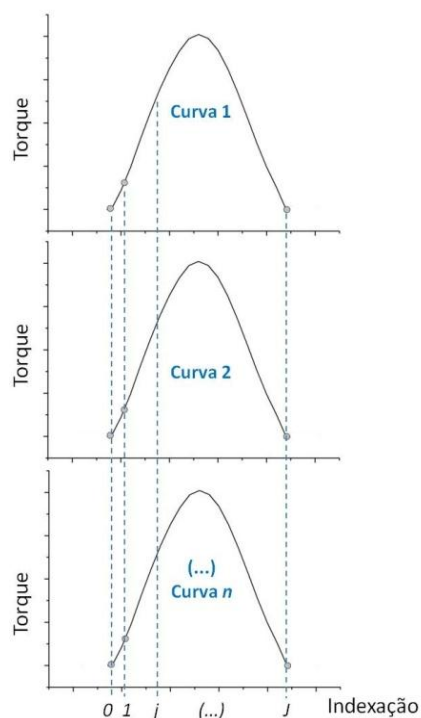


Figura 3.12 - Seleção das curvas de torque dos acionamentos e indexação vertical comum às curvas.

A nova indexação vertical das curvas de torque permite então uma análise entre as curvas de mesmo perfil de acionamento. O uso da indexação facilita a

avaliação dos mesmos pontos correspondentes em curvas diferentes. Ao comparar estes valores para avaliação da repetibilidade dos dados por exemplo, pode-se levantar o desvio padrão das leituras individuais dos torques ou dos erros que representam o instante j nas curvas.

A indexação das curvas, com o objetivo de identificar pontos individuais correspondentes em cada carregamento, dependerá da viabilidade desta sincronização ao referencial comum j proposto. A resolução tomada nas curvas, o número total de pontos compreendidos dentro do acionamento e os pontos de referência de simetria, como picos de torque e aceleração, são alguns parâmetros a serem considerados para essa sincronização. A depender de como se comporta a curva de carregamento, ou seja, como ela se apresenta no regime real de aplicação do torque dinâmico, a avaliação dos parâmetros do transdutor realizado por zonas de torque será mais produtiva e viável.

Além das regiões da curva mostradas na Figura 3.2, a indexação dos valores sugere que existam regiões de representatividade, ou seja, zonas definidas a partir de divisões da faixa em calibração do transdutor que demonstrem comportamentos semelhantes para uma caracterização mais específica da curva. A forma como será feita essa divisão dependerá da estabilidade das leituras.

A Figura 3.13 mostra o pareamento horizontal desses acionamentos, de forma a demonstrar como os valores nominais de torque são referidos em j para as taxas de variação positivas e j' para as taxas de variação negativa da grandeza.

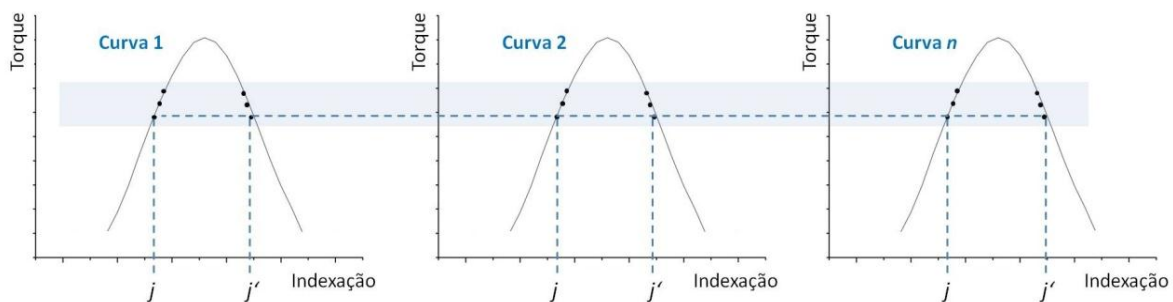


Figura 3.13 - Curvas de torque e uma mesma zona de torque identificada.

As zonas de torque abrangem valores nominais que devem se manter para todas as demais curvas do acionamento. Dessa forma, a repetibilidade pode ser avaliada por partes do acionamento que, por ser dinâmico e com taxas de variação

do torque entre valores positivos e negativos (ver Figura 3.3), apresentará regiões com maior estabilidade que outras ou maiores oscilações que outras.

A região mais próxima ao pico define os valores que representarão o pico de torque na curva. Para esta região, é importante identificar um valor único que a represente e, conseqüentemente represente também o pico de torque da curva em estudo. O valor de pico de torque pode ser considerado como o parâmetro mais direto a ser obtido na avaliação dos transdutores.

A região que apresenta as taxas de variação máximas apresenta os pontos com maior taxa de variação do torque. É de se esperar que, nesta região, os dados avaliados sob aspectos metrológicos como o parâmetro $E(i)$ e as dispersões de cada leitura tenham uma maior instabilidade se comparadas àqueles da “região de pico”.

Para a avaliação direta do torque através de valores individuais de $E(i)$, após a realização de todos os acionamentos, pode-se obter uma matriz ampla com essas diversas configurações e com a indexação dos valores de torque da faixa dentro dessa malha.

Assim, é possível, por exemplo, selecionar um determinado valor nominal de torque dentro da faixa de medição do transdutor e verificar o comportamento de erro de medição deste ponto de acordo com diferentes configurações finais de degrau de velocidade aplicado, de pico de torque da curva, de proximidade ou afastamento ao pico e da taxa de variação do torque.

Esta forma de avaliação mostrada até aqui pode ser denominada de avaliação direta ou calibração direta, pois trata, através da manipulação do erro de medição, a relação direta entre dois valores de torque, que ocorrem simultaneamente nas curvas..

A quantidade de pontos rastreáveis dependerá da qualidade das medições e do número total de blocos de acionamentos executados.

Outra forma alternativa e mais simples de avaliar a resposta do transdutor pode ser aplicada ao relacionando das grandezas de torque medido no transdutor, sendo T_t e T_{ti} , com a aceleração angular de referência (α_r), a partir de um rearranjo da Equação 2 obtendo-se para as relações da Equação 7.

$$\theta_{ct} = \frac{T_t}{\alpha_r} \quad ; \quad \theta_{cti} = \frac{T_{ti}}{\alpha_r} \quad (7)$$

De acordo com uma reprodução ideal do princípio físico, o valor de momento de inércia de massa calculado da subtração entre θ_{ct} e θ_{cti} deve ser equivalente ao valor de θ_r do corpo inercial usado no acionamento e portanto, constante em toda a curva.

A forma de avaliação, considerando a relação entre os torques e a aceleração é através da análise de linearidade. Esse tipo de avaliação pode ser considerado indireto sob o ponto de vista de acumular os vários pares em torno de uma determinação ou definição física do princípio. A Figura 3.14 mostra o comportamento teórico desta relação onde θ_s se equivale, de acordo com o princípio físico, ao momento de inércia de massa calculado θ_c .

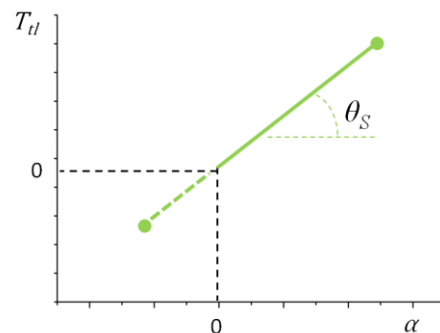


Figura 3.14 - Zonas de torque em uma curva de medição teórica.

Os extremos das linhas representam os pontos de pico de máximo torque inercial para ambas as condições máximas de aceleração (linha contínua) e desaceleração (linha tracejada). Os coeficientes de inclinação (coeficientes angulares) destas linhas representam os valores de momento de inércia de massa dos conjuntos de pares.

Na ocasião da calibração, uma única configuração de acionamento, nas diferentes configurações inerciais, pode ser aplicada várias vezes, originando vários pares que se repetirão, nominalmente, dentro dos domínios de todo o período do acionamento. Assim, na montagem do gráfico, os dados ficarão sobrepostos e a linha de tendência calculada considerando todos os pares medidos. O tratamento dos resíduos da curva ajustada, ou seja, a diferença entre os valores lidos e os

valores ajustados, indicará os desvios de linearidade presentes na faixa de acionamento.

3.4 Considerações finais do capítulo

As curvas apresentadas neste capítulo, para a representação didática dos acionamentos desejados para o regime de torque, são hipotéticas e têm o intuito de mostrar, de forma mais clara e qualitativa, as primeiras impressões a respeito das necessidades e possibilidades de uma metodologia de calibração dinâmica de transdutores de torque. Sobre essas curvas foram idealizadas as primeiras abordagens de avaliação de parâmetros de erro entre os sinais de torque e as relações entre as grandezas que cercam o princípio físico em adoção.

A partir desses parâmetros iniciais é possível derivar outras análises teóricas das curvas, como o foco nos levantamentos da repetibilidade, da histerese, da linearidade e da resolução. No entanto, é mais proveitoso que esse aprofundamento nas análises, que envolve a determinação de equações, o pareamento de parâmetros e os cálculos estatísticos, seja realizado sobre um viés mais prático, a partir da manipulação e do entendimento de dados reais obtidos experimentalmente, uma vez que o acionamento já tem um perfil delineado. Dessa forma, a teoria de determinação de parâmetros é paralela à realimentação prática dos fatos.

Elementos práticos comuns à natureza destes tipos de acionamento como as oscilações e as perturbações em geral, servem de componentes restritivos à metodologia proposta, ao mesmo tempo que atuam como validadores do princípio proposto, o que deve ser um dos principais resultados desta tese.

O Capítulo 4 objetiva, portanto, abordar simultaneamente os acionamentos reais e a avaliação de parâmetros e elementos que devem estar relacionados tanto à caracterização do padrão, quanto aos elementos que interferem na capacidade de realização e medição dos valores obtidos de torque T_{tl} e T_{ir} .

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO E RESULTADOS

No capítulo anterior foram determinados os passos básicos para a obtenção dos valores de torque e como tratar esses valores dentro de uma metodologia de medição a partir de uma sequência de acionamentos abrangente. Os torques T_{tl} e T_{ir} foram definidos e as primeiras abordagens de como trabalhar a comparação entre esses dois valores de torque foram mostradas. Juntamente aos elementos básicos de uma configuração de sistema capaz de realizar os acionamentos de referência, é importante discutir como trazer as teorias apresentadas no Capítulo 3 da forma mais adequada à realidade experimental dos acionamentos.

Este capítulo apresenta, portanto, ferramentas práticas e também teóricas, de experimentos em bancadas e simulações computacionais, utilizadas para a avaliação do princípio proposto já vislumbrando o delineamento das condições reais de acionamento e a repercussão destas na estrutura e no método a serem definidos.

A validação da proposta de aplicação do princípio físico inclui a identificação dos comportamentos possíveis que o transdutor de torque apresentará sob os determinados regimes transientes da grandeza. Com os exemplos práticos das curvas reais é possível detalhar as formas de se trabalhar as grandezas estatisticamente e de definir aqueles que devam ser os parâmetros avaliáveis do transdutor de torque dinâmico.

O desenvolvimento do capítulo se dá pela avaliação de parâmetros nos seguintes meios:

- *Bancadas de testes inerciais (Bancadas #1 e #2)*: testes de aplicação do princípio físico e simulação do regime proposto para a geração do torque de referência. Testes iniciais de acionamento com os componentes principais: conjunto acionador, sensor para aceleração e unidade de

aquisição de dados. Teste da metodologia de calibração com a reprodução das sequências de medição e operação do sistema.

- *Simulações computacionais*: respostas dinâmicas do sistema a partir da inserção de irregularidades à montagem como a descentralização e variação de parâmetros de leitura, como as taxas de aquisição;
- *Sistemas de calibração*: obtenção de resultados e simulação de procedimentos de calibrações estáticas que caracterizem metrologicamente alguns componentes do padrão, como os corpos inerciais, com suas capacidades e incertezas de medição.

A Tabela 4.1 mostra, mais detalhadamente, quais métodos e materiais são aplicados à validação ou à avaliação de cada característica interessante do procedimento de calibração ou do sistema de calibração dinâmica do torque. Essa tabela é importante, pois resume como um complemento à metodologia de pesquisa, os passos tomados para abordar os vários parâmetros presentes no sistema de calibração, abrangendo a maior complexidade possível de temas para este demonstrativo inédito da nova proposta.

Tabela 4.1 - Relação entre o que está sendo avaliado na proposta e o método usado para a avaliação.

MATERIAL OU MÉTODO ⇨	Bancada experimental #1	Bancada experimental #2	Simulações computacionais	Sistemas de medição e calibração estáticos
PARÂMETRO AVALIADO/TESTE ⇩				
Perfil de acionamento	X			
Geração do torque de referência	X	X		
Metodologia de medição (parâmetros avaliáveis dos transdutores)	X	X		
Metodologia de medição (sequência de operação)		X		
Influências mecânicas na montagem		X	X	
Processamento de sinais e métodos de aquisição de dados	X	X	X	
Incerteza de medição	X	X	X	X
Procedimento de caracterização dos sistemas de calibração	X	X	X	X
Procedimento de calibração	X	X	X	X

À medida que os parâmetros avaliados e os materiais utilizados para tal avaliação vão sendo apresentados e que os resultados das simulações e das práticas sejam também obtidos, conclusões pontuais, ou até pareceres parciais também são elaborados para, ao final dos testes, serem concatenados na avaliação mais abrangente possível da proposta.

A partir da montagem básica apresentada na Figura 3.6 do capítulo anterior, os elementos funcionais puderam ser identificados. Estes componentes devem ser detalhados e avaliados quanto à sua capacidade de resposta à intenção de aplicação das curvas de torque de referência sob demandas específicas de um sistema metrológico de referência. O modelo básico de medição e a sequência para a operação do sistema introduziram questões principais a serem avaliadas, o que transfere ao projeto alguns desafios e requisitos para a adaptação de componentes reais ao sistema de medição.

É importante ressaltar que os resultados de medições obtidos nos sensores de torque que estejam sendo utilizados nas bancadas experimentais servem prioritariamente à derivação de uma metodologia de avaliação destes equipamentos, através do delineamento de perfis de acionamento e possíveis comportamentos desses sensores. Não é, portanto, objetivo desta tese decretar um resultado de calibração especificamente para os sensores utilizados nos testes. O escopo da pesquisa não cobre a demonstração desses resultados, mas sim os métodos e ferramentas viáveis para se chegar a eles.

Pela falta de sistema metrológico com fins similares ao proposto nesta tese, a pesquisa foca o teste e a validação do conceito. Isto significa que, embora as configurações de montagens tenham sido selecionadas para compor os estudos práticos dos componentes, trata-se aqui de sistemas que buscam atender aos testes conceituais de aprovação de um modelo proposto.

Os resultados obtidos estão independentes de uma abrangência definida de faixas nominais de carregamento ou qualquer outra especificidade que venha restringi-los a determinados parâmetros.

4.1 A bancada experimental #1

Como já foi explicado anteriormente, o componente acionador deve ser capaz de gerar as curvas de aceleração propostas para a geração do torque inercial de referência com valores de taxas de variação do torque suficientemente altas, como desenhado na Figura 3.5.

O controle dessa aceleração deve reproduzir os acionamentos sob condições de repetibilidade que permitam características de pico e taxas de torque semelhantes para as curvas. O acionador deve ser capaz de suportar os torques inerciais provenientes do eixo de medição onde o acionamento de eixos girantes por motores elétricos é a forma mais comum aplicada na indústria.

Os principais componentes do primeiro sistema utilizado para aplicação e validação do método proposto, bancada #1, estão descritos com mais detalhes no Apêndice B.1. Detalhes sobre o motor elétrico estão mostrados no Apêndice B.2.

Para o sistema de calibração dinâmica do torque, é de grande interesse que as rampas de aceleração possam ser repetidas dentro dos intervalos de velocidade. O inversor de frequência altera a frequência de rede que alimenta o motor elétrico, possibilitando que a velocidade de acionamento do rotor também possa ser alterada.

A precisão de controle da velocidade em patamares constantes é de 0,01% segundo o manual desses equipamentos⁸⁸. No entanto, não existe informação a respeito da precisão de controle ou da repetibilidade durante as rampas de aceleração, desaceleração ou transientes.

Deve-se frisar que as capacidades em potência e velocidade do motor selecionado para acionamento do eixo de medição serão as principais restrições de alcance em torque nominal, ou de pico, para o sistema de calibração dinâmica, independentemente das taxas de variação de torque que se consiga obter das combinações de tempo de aceleração e corpos inerciais.

Pode-se observar na Figura B.3, reproduzida do Apêndice B, que a curva “S” com uma configuração para 100% de suavização se assemelha bastante com a curva de velocidade angular sugerida na proposta de regime de referência da Figura 3.5.b. De posse dessas informações, definiu-se avaliar a resposta real de aceleração de um motor AC controlado por inversor de frequência uma vez que este conjunto se mostrou promissor para os objetivos propostos nos acionamentos. Essa avaliação

deve abranger desde a controlabilidade do motor até a real equivalência com o regime de referência proposto.

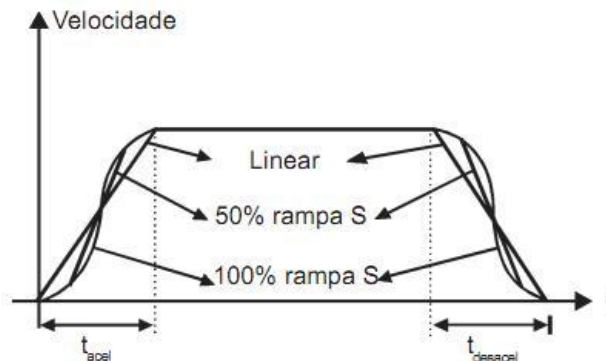


Figura B.3 - Rampas de aceleração e desaceleração conduzidas por um inversor de frequência⁸⁸.

A Figura 4.1 mostra esquematicamente como ficou a disposição dos componentes. Essa montagem permite então uma série de testes diferentes que abrangem desde a determinação da curva real de acionamento até abordagens referentes à aquisição e tratamento de dados.

Além da necessidade de se avaliar as curvas reais de acionamento aplicadas pelo conjunto acionador, a bancada #1 possibilita a avaliação de outros componentes e parâmetros que já são importantes ou que possam vir a configurar na proposta final do sistema de calibração, como por exemplo, as formas de tratamento dos dados de velocidade e torque, ou a utilização do sensor de velocidade como referência para essa grandeza.

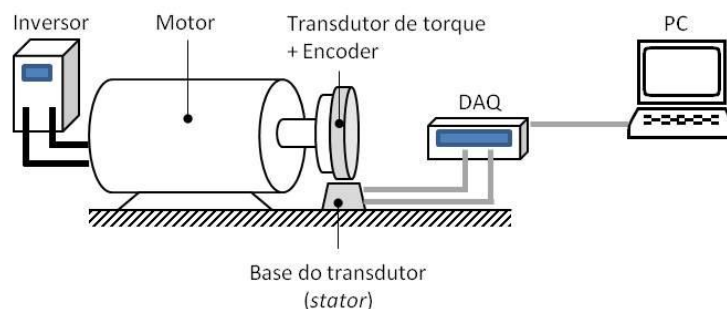


Figura 4.1 - Esquema da Bancada #1.

Nesta bancada o transdutor tem um disco de 360 ranhuras acoplado a ele. De acordo ao método de leitura dobrada, o *encoder* passa a ter uma resolução de leitura de $0,5^\circ$ embora a resolução física permaneça equivalente a 1° (ver Apêndice

B.3). A Figura B.1, reproduzida do apêndice B, mostra como ficou a bancada #1 e seus componentes.

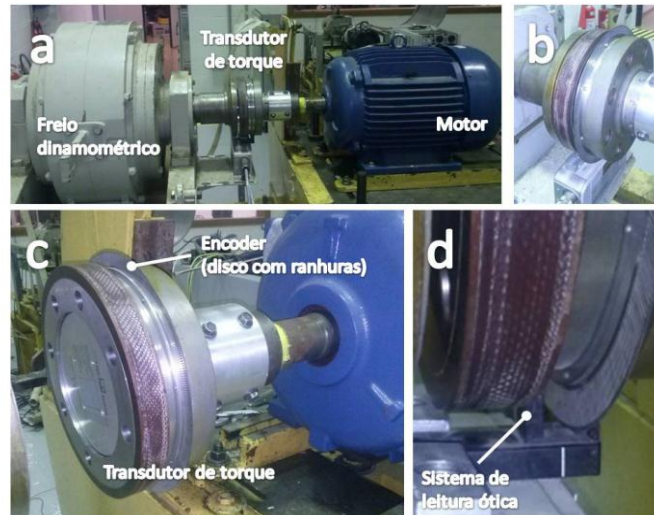


Figura B.1 - Fotos da bancada #1 (descrição detalhada no Apêndice B).

Para obtenção da aceleração, a Equação 8 foi utilizada para a derivação do sinal de velocidade onde são considerados os instantes $i - 1$ e $i + 1$ e o intervalo de tempo Δt sobre os quais se calcula a aceleração α_i . A determinação específica da equação adotada para o cálculo da derivada é importante pois integrará o modelo metrológico do mensurando, que identificará o máximo possível de variáveis de entrada.

$$\alpha_{(i)} = \frac{\omega_{(i+1)} - \omega_{(i-1)}}{2 \cdot \Delta t} \quad (8)$$

Onde:

α	Aceleração angular calculada	(rad·s ⁻²)
$\omega_{(i+1)}$	Velocidade angular medida no instante i+1	(rad·s ⁻¹)
$\omega_{(i-1)}$	Velocidade angular medida no instante i-1	(rad·s ⁻¹)
Δt	Intervalo de tempo entre valores de velocidade (período de amostragem)	(s)

O valor atribuído a Δt está relacionado à taxa de amostragem empregada na aquisição dos dados. Uma taxa de amostragem de 50 Hz por exemplo, vai determinar um Δt de 0,02 s. A influência da variação da taxa de amostragem nos dados medidos também é objeto de estudos na bancada.

4.1.1 Testes de acionamento

Os testes de acionamento no conjunto motor e inversor tem, num primeiro momento, o propósito de caracterizar suas curvas de velocidade e aceleração, traçando o perfil das mesmas e a sua aplicabilidade ao proposto para o padrão.

Na bancada #1 o torque de carga (T_{carga}) é praticamente nulo para o modelo pois, não existe um carregamento externo ao eixo que seja significativo para a modelagem nominal do tempo de aceleração. A avaliação de torques externos parasitas será abordada na discussão para os testes da bancada #2 e para a modelagem metrológica avançada do sistema.

Segundo o manual do fabricante⁸⁹, o valor do momento de inércia de massa do rotor (θ_{rot}) é aproximadamente $0,215 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Na bancada #1 o eixo é formado pelo transdutor de torque, cujo momento de inércia de massa (θ_{tra}) é $0,01320 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ⁹⁰ e o acoplamento utilizado para conectá-lo ao rotor, cujo momento de inércia é de aproximadamente $0,00552 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Esse conjunto tem um valor total de momento de inércia de massa (θ_{eix}) de aproximadamente $0,0187 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Considerando para o cálculo um degrau de velocidade (Δv) ajustado para $52,4 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e substituindo os demais parâmetros na Equação B.1, do Apêndice B, calcula-se um tempo de aceleração mínimo de $0,55 \text{ s}$.

Esse parâmetro de tempo de aceleração mínimo define que, os tempos de aceleração nos degraus de velocidade de $52,4 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, dentro da faixa máxima de $370,71 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, devem ser ajustados acima deste valor de $0,55 \text{ s}$ calculado, caso contrário, a função de proteção de sobrecorrente do inversor deve operar e o conjunto será automaticamente desligado.

Os testes devem, portanto varrer diferentes valores de t_a além de também variar o intervalo de velocidade em que ocorrem, pois recuperando o conceito da Figura B.2, do Apêndice B, a curva de torque varia seus limites conforme se varia também a velocidade angular de operação.

A Tabela 4.2 resume as informações da bancada e do acionamento proposto.

Tabela 4.2 - Parâmetros do conjunto acionador da bancada #1 para determinação do tempo de aceleração mínimo (t_{a_min}).

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
P_{nom_mot}	15 kW
v_{nom_mot}	370,71 rad·s ⁻¹
T_{nom_mot}	40,46 N·m
T_{carga}	0,0 N·m
θ_{mot}	0,215 kg·m ²
θ_{eixo}	0,0187 kg·m ²
Δv	52,4 rad·s ⁻¹
t_{a_min}	0,55 s

A sequência utilizada para cada configuração de acionamento e medições foi a seguinte:

- I. Ajuste no inversor do tempo de aceleração e do intervalo de velocidade;
- II. Checagem e acionamentos testes;
- III. Início da aquisição dos dados (velocidade angular e torque);
- IV. Acionamento do motor para a curva de aceleração do limite inferior (inicial) de velocidade até o limite superior (final) do intervalo;
- V. O motor é então desacelerado até o limite inferior de velocidade;
- VI. Repete-se o acionamento num total de 3 vezes para verificar a existência de comportamentos discrepantes e obter uma avaliação da repetibilidade na sobreposição das curvas;
- VII. Finalização da aquisição;
- VIII. Tratamento dos dados com cálculo dos valores de aceleração angular.

Uma primeira bateria de acionamentos consiste na variação do tempo de aceleração mantendo-se constantes os limites e o intervalo de velocidade. A desaceleração não foi controlada com o mesmo rigor da aceleração, pois o tempo de desaceleração foi ajustado para um valor bem mais alto que o tempo de aceleração e não foi avaliada nestes testes.

O intervalo de velocidade selecionado foi de 261,6 rad·s⁻¹ até 313,8 rad·s⁻¹, pois este estaria no intermédio da faixa de velocidade nominal do motor, que é a região estável de mais alta capacidade de absorção dos torques de aceleração (ver

Figura B.2). Os tempos de aceleração ajustados no inversor foram: 2,0 s; 1,0 s; 0,8 s; 0,6 s; 0,5 s e 0,4 s.

Para levantamento dos gráficos, o eixo das abscissas foi mantido com os instantes de tempo originais das medições em todo o período dos 3 acionamentos. Posteriormente, na análise da repetibilidade das curvas, estes intervalos de tempo serão substituídos pela indexação j .

As Figura 4.2.a e Figura 4.2.b mostram que, nas curvas de velocidade e aceleração para os tempos de aceleração de 0,6 s e 0,5 s respectivamente, quando atingem o trecho identificado pelo círculo vermelho, surge um ressalto na continuidade dos dados de aceleração, o que descaracteriza parcialmente a curva de acionamento da forma que se pretende tê-la, com ambos os lados contínuos e sem realces, para a geração do torque inercial de referência.

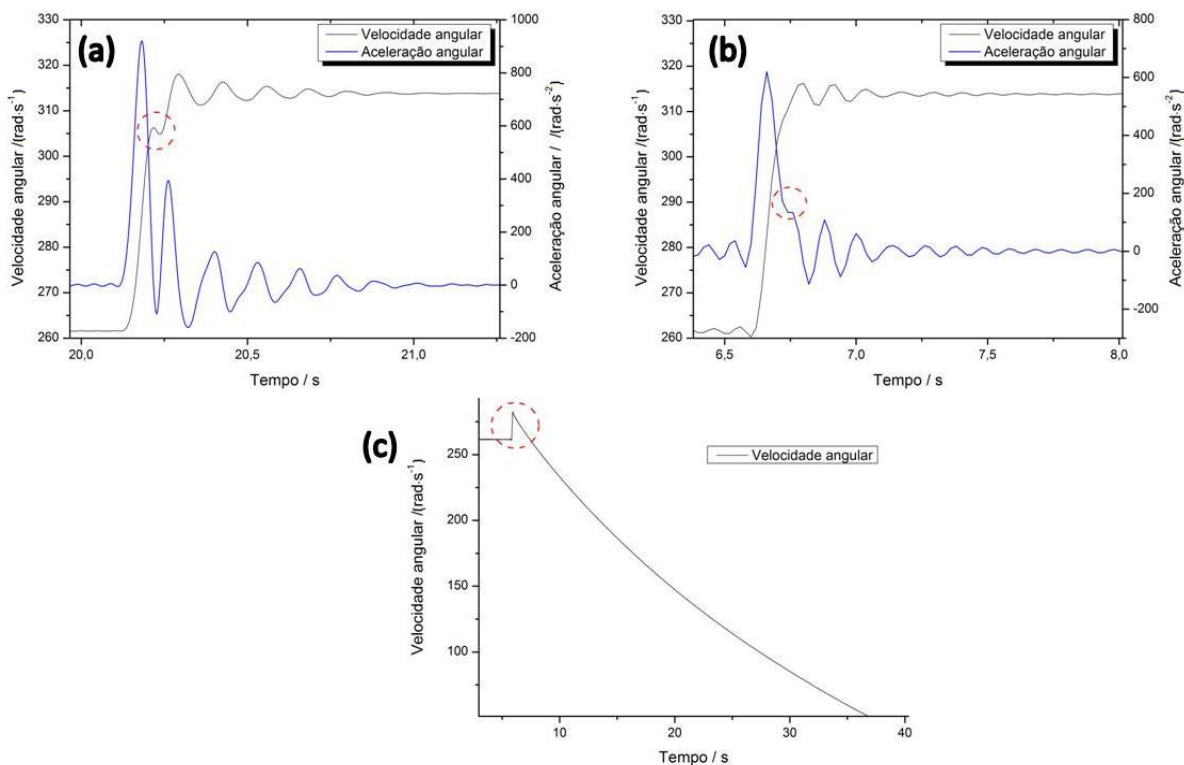


Figura 4.2 - Curvas de aceleração e velocidade dos acionamentos rejeitados, parametrizados no intervalo ($261,6 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$; $313,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) para os tempos (a) $t_a = 0,6 \text{ s}$; (b) $t_a = 0,5 \text{ s}$. Em (c), curva de velocidade na tentativa de acionamento no tempo $t_a = 0,4 \text{ s}$.

Já no gráfico da Figura 4.2.c o círculo vermelho indica o instante em que o conjunto acionador tenta aplicar a aceleração e o sistema de segurança de sobrecarga responde com a desativação do motor, que passa a desacelerar até atingir o repouso. Esses três gráficos podem levar à conclusão que, mesmo se

calculando um $t_{a,min}$ de 0,55 s, o inversor de frequência conseguiu acelerar o conjunto nos tempos de 0,5 s e 0,6 s. No entanto, os perfis tanto de velocidade quanto de aceleração apresentam imperfeições se avaliados quanto à continuidade e suavidade de aplicação dos regimes, o que em princípio se buscou evitar.

A partir dessas restrições pode-se concluir que o inversor tem dificuldade em seguir valores de tempo de aceleração próximos ao tempo mínimo, embora funcione adequadamente para o controle de aceleração visando apenas à partida de uma velocidade v_{ini} até a estabilização em um patamar seguinte de v_{fin} , num intervalo $(v_{ini}; v_{fin})$ objetivo mais comum em aplicações indústria desses controladores. As avaliações desta primeira bateria de acionamentos terão, portanto foco nos tempos de aceleração ajustados para 2,0 s, 1,0 s e 0,8 s.

Os gráficos da Figura 4.3.a até a Figura 4.3.c mostram uma das três rampas de velocidade para cada sequência de acionamento em cada t_a aplicado, ver Tabela 4.3. Nestas figuras, além das curvas de velocidade, também estão mostradas as curvas de aceleração calculadas pela derivação dos dados de velocidade através da Equação 8, o que proporciona uma avaliação qualitativa do comportamento das mesmas.

A segunda bateria de testes objetiva avaliar a resposta do acionamento variando-se os limites de velocidade sobre um mesmo degrau Δv ajustado em $52,4 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e mesmo tempo de aceleração t_a de 2,0 s e taxa de aquisição de 50 Hz. Os intervalos de velocidade aplicados foram $(261,6 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}; 313,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1})$, $(209,1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}; 261,6 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1})$ e $(156,9 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}; 209,1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1})$. Os gráficos da Figura 4.3.d até a Figura 4.3.f mostram os comportamentos de velocidade e aceleração para a segunda bateria de testes.

De forma a facilitar a correspondência das características dos acionamentos, daqui por diante no texto estes serão identificados conforme Tabela 4.3. As curvas originais de velocidade obtidas dos canais do sistema de aquisição de dados (DAQ - *Data Acquisition System*) apresentavam ruídos que tiveram de ser tratados para que, no processo de derivação, estes tivessem sua influência nos resultados minimizada.

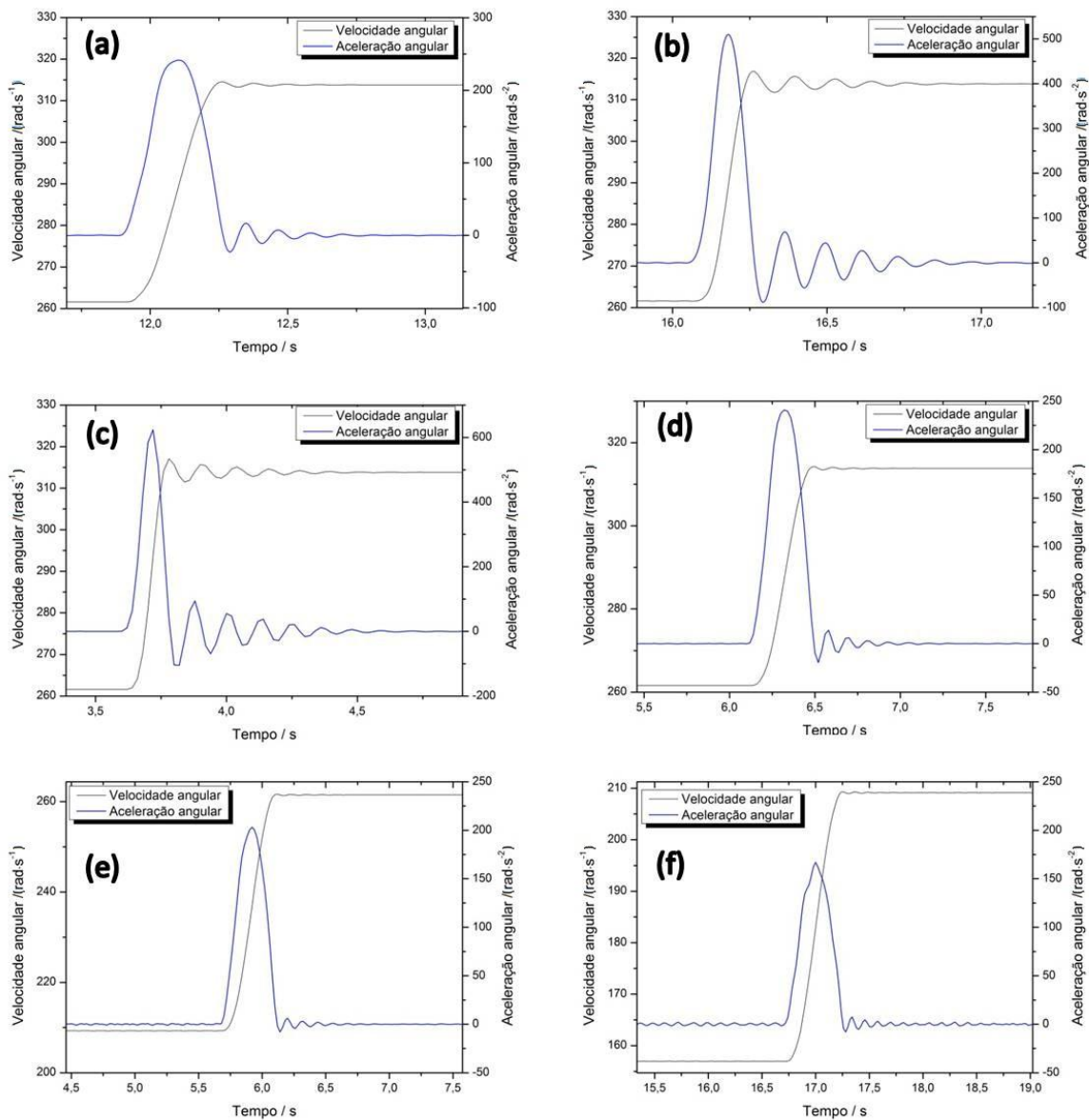


Figura 4.3 - Curvas de aceleração e velocidade nos acionamentos: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5, (f) Ac#6.

Tabela 4.3 - Parâmetros dos acionamentos aplicados.

Acionamento	Intervalo de velocidade $/ (\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	t_a $/ \text{s}$	Taxa de aquisição $/ \text{Hz}$
Ac#1		2,0	300
Ac#2	(261,6; 313,8)	1,0	300
Ac#3		0,8	50
Ac#4	(261,6; 313,8)		
Ac#5	(209,1; 261,6)	2,0	50
Ac#6	(156,9; 209,1)		

A solução foi o processamento *off-line* dos dados através da aplicação de um filtro digital tipo Bessel passa-baixa. A frequência de corte utilizada foi de 20 Hz para todos os acionamentos, pois além de harmonizar as análises nesse parâmetro, esta frequência corresponde a um valor de velocidade angular inferior ao menor limite de velocidade dos intervalos que é de $156,9 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$.

Antes da avaliação da repetibilidade e do alcance nominal das curvas, cabe destacar o fato de o comportamento do acionamento pelo controle da velocidade apresentar características de controle de sistemas de segunda ordem sub amortecidos.

Retomando como exemplo o acionamento para t_a igual a 1,0 s, a Figura 4.4.a mostra que existe um *overshoot* e as oscilações que convergem para o valor do patamar de velocidade final ajustado no inversor de frequência, neste caso $313,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$.

Embora não seja o foco da tese a modelagem de parâmetros que componham por exemplo a função de transferência que descreva um sistema dinâmico, seja ele de segunda ou primeira ordem, como as frequências naturais e os coeficientes de amortecimento, a existência desse comportamento determina que a avaliação das curvas de aceleração que vão compor o torque de referência deva considerar estas oscilações, que fazem parte do fenômeno físico.

Essa diferenciação entre os trechos definirá também as regiões distintas para o estudo nas curvas de aceleração, como mostra a Figura 4.4.b.

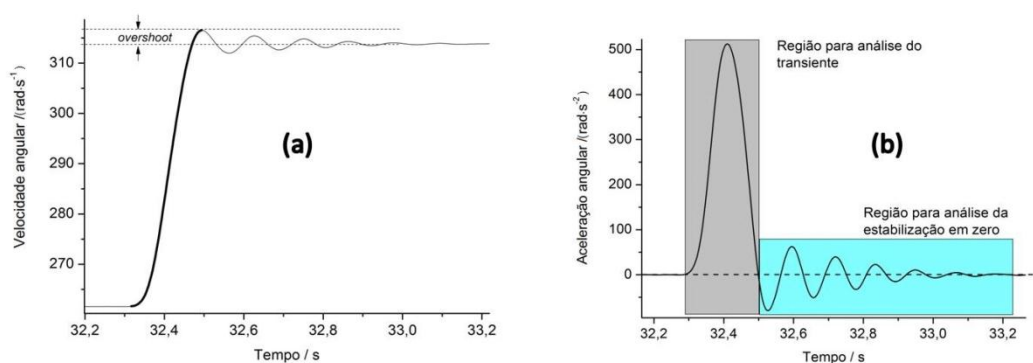


Figura 4.4 - Exemplo de regiões (acionamento Ac#2): (a) Rampa de velocidade com *overshoot* e trecho destacado a ser considerado para o regime transiente e (b) Curva de aceleração para exemplificar as regiões de transiente e de oscilação (estabilização do controle).

Num primeiro momento, para avaliar a resposta de transiente das curvas de velocidade controladas pelo inversor, o interesse na curva de acionamento vai se restringir ao trecho referente ao transiente da rampa. O critério para seleção do trecho representativo do transiente é o intervalo que envolve o início da curva até o pico de *overshoot*. No caso da aceleração, os dois pontos de corte da linha de aceleração zero no início e na decrescente.

A Figura 4.5 mostra as três rampas de velocidade para os trechos de transiente das curvas sobrepostas e indexadas em j para cada sequência de acionamentos em determinados t_a . Vale destacar a semelhança entre os perfis das curvas experimentais de velocidade e aquele proposto hipoteticamente para a curva na Figura 3.5.b, ainda que a curva experimental derivada para a aceleração apresente extremos mais suaves, que é uma consequência do acionamento real.

A sobreposição foi realizada com a seleção manual dos dados de velocidade e tempo em cada rampa de velocidade e, em uma avaliação comparativa e qualitativa dos gráficos, pode-se concluir inicialmente que existe uma boa repetibilidade entre as curvas, sem comportamentos que gerem descontinuidades ou mudanças bruscas de velocidade para os tempos de aceleração propostos para ajuste no inversor.

Cabem a seguir algumas descrições e observações mais aprofundadas sobre os resultados e os testes em uma abordagem mais específica, já visando uma avaliação quantitativa dos dados.

É importante frisar que, conforme proposta na metodologia de medição, a indexação em j é importante para que caracterize as regiões ou zonas de aceleração e torque nas respectivas curvas de acionamento uma vez que a avaliação desses dados poderá ser feita por zonas de torque e principalmente considerando o parâmetro $E(j)$ dominante nas análises, pois, como já foi colocado anteriormente e será demonstrado mais a frente, para cada valor de aceleração haverá um valor de torque medido e um valor de torque de referência simultâneos.

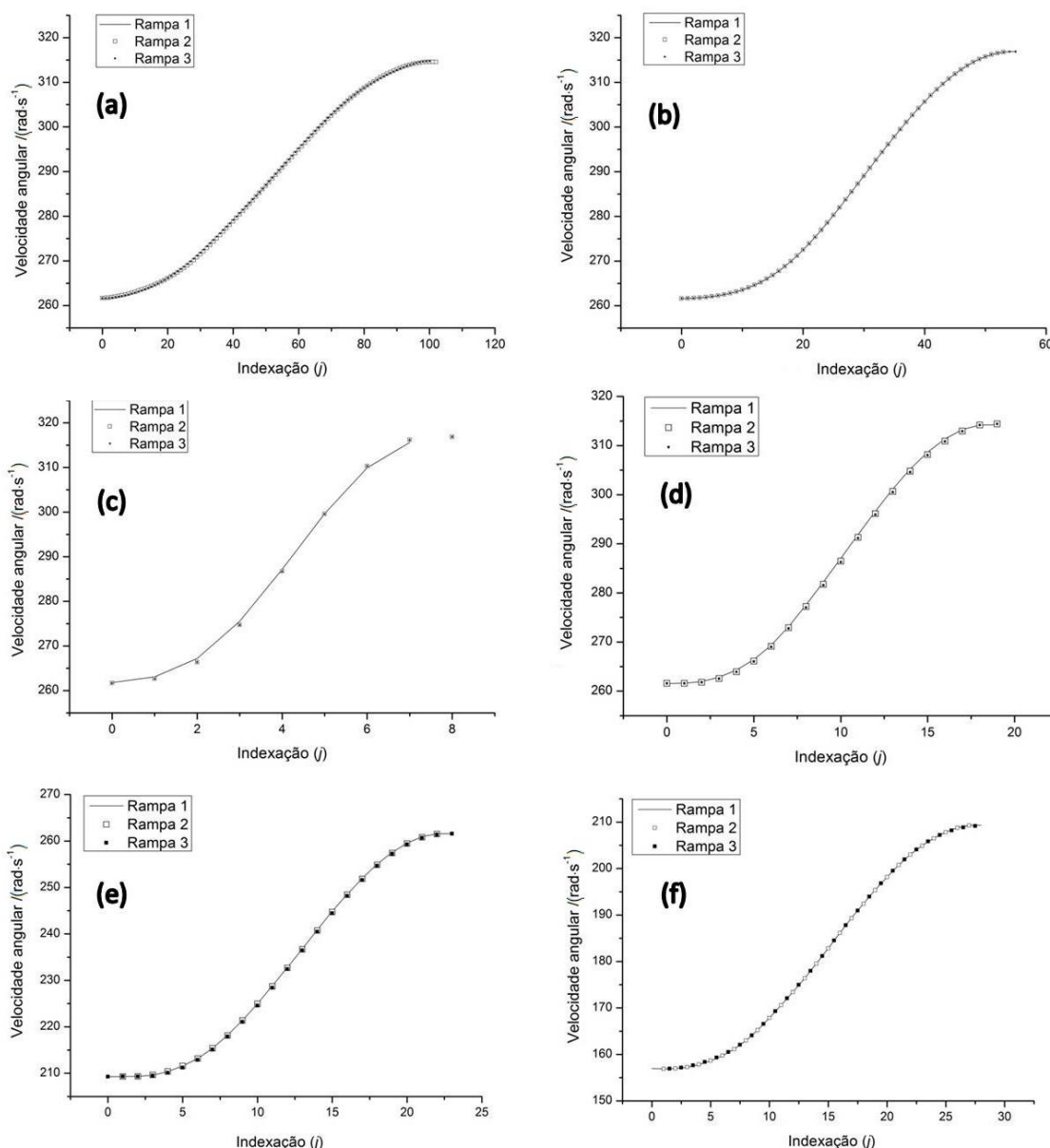


Figura 4.5 - Rampas de velocidade nas configurações de acionamento: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5 e (f) Ac#6.

4.1.2 Avaliação das curvas de aceleração

Até este ponto os acionamentos foram avaliados de forma qualitativa, ou seja, a partir apenas das observações dos vários gráficos de curvas de velocidade sobrepostas, o que já demonstrou de certa forma um bom comportamento das rampas de velocidade. No entanto, a grandeza que se deve avaliar mais densamente é a aceleração pois a partir dessa que se calcula o torque de referência a ser aplicado ao transdutor em calibração.

Como uma primeira referência de valores e capacidades de aceleração, a Tabela 4.4 mostra as médias dos picos de aceleração em cada configuração de acionamento.

Tabela 4.4 - Médias dos picos de aceleração.

<i>Acionamento</i>	<i>Médias dos picos de aceleração (experimental) / (rad·s⁻²)</i>
<i>Ac#1</i>	243,36
<i>Ac#2</i>	510,15
<i>Ac#3</i>	612,95
<i>Ac#4</i>	240,78
<i>Ac#5</i>	203,06
<i>Ac#6</i>	166,84

Observando os resultados dos acionamentos Ac#1 e Ac#4, calcula-se uma diferença entre as médias dos picos de aceleração de aproximadamente 1,1%, o que é consequência das diferentes taxas de aquisição para ambas configurações, respectivamente 300 Hz e 50 Hz. Esse resultado ajuda a reforçar a necessidade de um estudo mais completo a respeito da influência da taxa de aquisição nos valores tomados das medições para esse tipo de fenômeno, tópico que será retomado mais a frente.

Pelos dados mostrados nos acionamentos Ac#4, Ac#5 e Ac#6, observa-se também que, embora os acionamentos estejam ocorrendo em degraus de velocidade iguais ($\Delta v = 52,36 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$), o que deveria gerar picos de aceleração iguais uma vez que se manteve o tempo de aceleração, existe na verdade diferenças entre os valores desses picos de aceleração. Isso demonstra que, a depender da faixa de velocidade em que ocorram os acionamentos, o conjunto motor e inversor poderá apresentar maiores ou menores valores finais de aceleração e conseqüentemente, também valores diferentes para os torques.

Outro resultado que merece destaque na análise das acelerações é a relação entre a aceleração média teórica e a aceleração média experimental. Tomando como exemplo o acionamento Ac#2, a Figura 4.6 mostra as curvas de velocidade e aceleração calculada. Tomando como referência no gráfico desta figura, o ponto no instante de tempo no qual se inicia a curva de aceleração e, a partir deste definindo um período equivalente a 1,0 s, que abrange inclusive a região de oscilação do

controle para estabilização em v_{fin} , pode se obter uma velocidade média experimental para os dados de velocidade $\alpha(i)$ incluso nesse período. Essa velocidade média pode ser comparada a velocidade teórica, calculada pela razão entre o degrau de velocidade (Δv) e o período ajustado no inversor, conforme Equação 9.

$$\alpha_{teórica} = \frac{\Delta v}{t_a} \quad (9)$$

A linha tracejada no gráfico da Figura 4.6 mostra como seria a rampa de velocidade considerando a aceleração teórica, neste caso, constante.

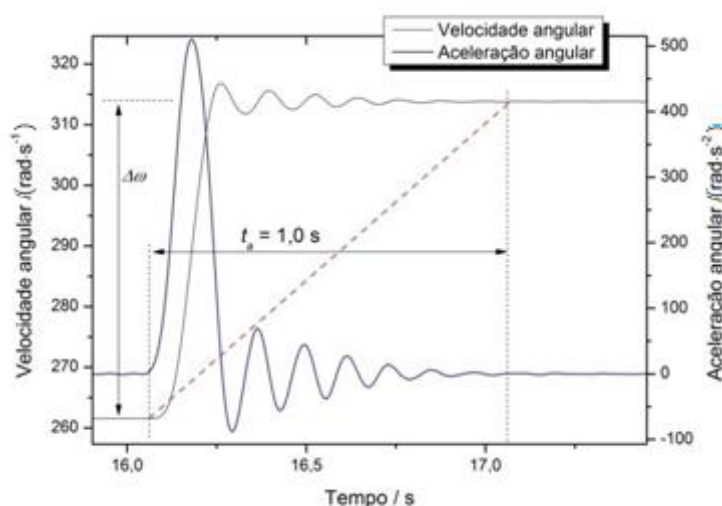


Figura 4.6 - Curvas de aceleração e velocidade medidas no Ac#2 com identificação do tempo de aceleração teórico ajustado no inversor de frequência ($t_a = 1,0$ s).

Existe, portanto um pico de aceleração em cada acionamento e será este valor que vai também gerar um pico de torque.

A Tabela 4.5 mostra, como exemplo, os resultados das acelerações teóricas e as médias das acelerações obtidas dos experimentos Ac#1, Ac#2 e Ac#3. Observa-se que esses valores calculados são coerentes mas demonstram que os valores de pico de aceleração podem estar muito acima dos valores teóricos.

Essa diferença entre a teoria do acionamento e a prática de medições vai também se refletir na estimativa dos torques de aceleração e, conseqüentemente, das potências mecânicas a que o motor estará sujeito.

A avaliação envolvendo as medições do torque e as suas correlações com esses picos de aceleração será abordada no capítulo 4.1.3.

Tabela 4.5 - Comparação entre a aceleração teórica e as acelerações médias experimentais dos acionamentos Ac#1, Ac#2 e Ac#3.

Acionamento	Aceleração teórica / (rad·s ⁻²)	Aceleração média experimental / (rad·s ⁻²)
Ac#1	26,10	26,08
Ac#2	52,20	52,03
Ac#3	65,25	63,90

Como já foi mostrada anteriormente, a aceleração é calculada pela derivação do sinal de velocidade. O processo de derivação de um sinal amplifica as imperfeições e ruídos, ou seja, as perturbações na rampa de velocidade que não estavam tão identificáveis visualmente, podem passar a ter maior visibilidade e conseqüentemente significarem interferências no sinal de aceleração, ou seja, pode haver instabilidade no sinal.

É importante portanto que se aprofunde a avaliação quantitativa desses acionamentos quanto à sua estabilidade e repetibilidade, o que será feito pelo cálculo do desvio padrão da média das acelerações $S(\bar{\alpha}(j))$ em cada ponto de indexação j , em cada curva n , para um total de $N = 3$ curvas em cada configuração de acionamento, segundo Equação 10⁹⁵.

$$S(\bar{\alpha}(j)) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\alpha(j, n) - \bar{\alpha}(j))^2} \quad (10)$$

O número total de indexações (J) em cada curva de aceleração define sobre sua resolução. Os gráficos da Figura 4.7 mostram esses resultados juntamente com a curva de aceleração média para todas as indexações.

Pode-se observar um comportamento comum às curvas desta figura, que é a maior dispersão de valores nas suas extremidades, ou seja, próximo aos valores iniciais e finais de aceleração nula, enquanto que nas regiões adjuntas aos picos de aceleração (aceleração máxima) os desvios se apresentam bem menores, atingindo um patamar de estabilização menor que 1%.

A exceção aparece na curva do acionamento Ac#2 (Figura 4.7.b), onde percebe-se uma decaída sistemática nos valores de desvio sem apresentarem o

patamar de estabilização, embora o valor de desvio padrão na região de pico de aceleração permaneça próximo de zero.

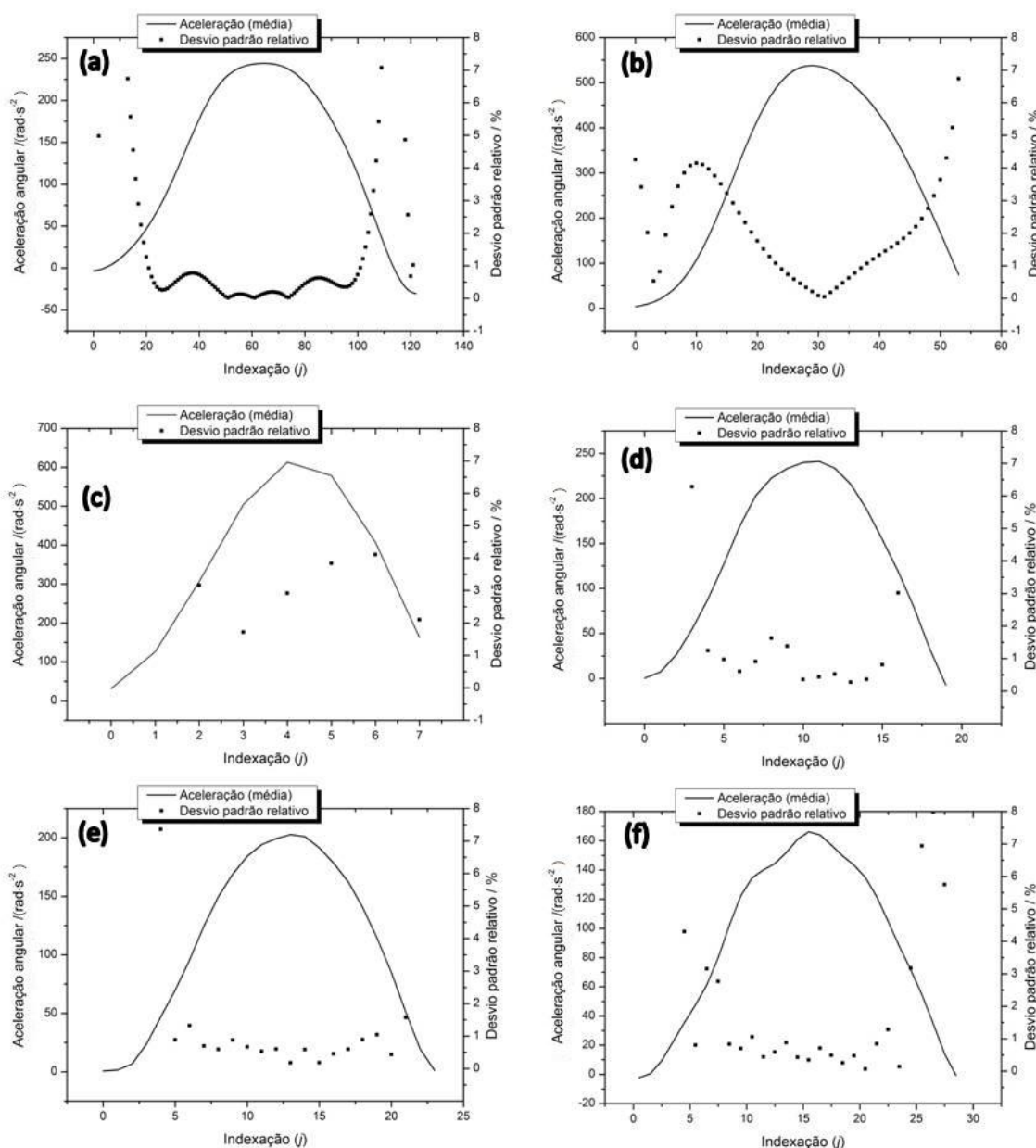


Figura 4.7 - Curvas de médias das acelerações e desvios padrões relativos para as configurações de acionamentos: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5, (f) Ac#6.

Novamente, as configurações de acionamento Ac#1 e Ac#4, que representam o mesmo fenômeno, apresentam comportamentos de desvio das leituras bem semelhantes conforme se vê nas curvas da Figura 4.7.a e Figura 4.7.d.

A simetria da curva de aceleração, correspondente ao trecho transiente em velocidade, em relação a um eixo imaginário que corte perpendicularmente a abscissa passando pelo pico da curva pode ser verificada a partir dos dados experimentais, de forma a compor mais um parâmetro de definição desses

carregamentos. Essa avaliação não necessita ser muito rigorosa no sentido de exigir uma simetria perfeita das curvas, mas deve ser suficiente para identificar a ordem de grandeza que quantifique o quão distantes estão as medições do instante de pico para determinar se as características de acionamento são muito distintas em ambos os lados crescente e decrescente da curva.

O método para determinação dessa simetria envolve a avaliação das taxas de aceleração, que é a derivada dos valores de aceleração, utilizando a Equação 8, adaptada agora à variação da aceleração. Como exemplo gráfico desse procedimento, a Figura 4.8 mostra as curvas da aceleração angular e as taxas de variação dessas acelerações nos acionamentos Ac#1 e Ac#2.

A taxa de variação da aceleração nula corresponderá exatamente ao ponto de pico de aceleração e esse será o eixo de simetria para a análise. Isso define também que, na zona de pico, esta taxa estará muito próxima de zero e portanto, trará maior estabilidade aos dados de aceleração nesta região.

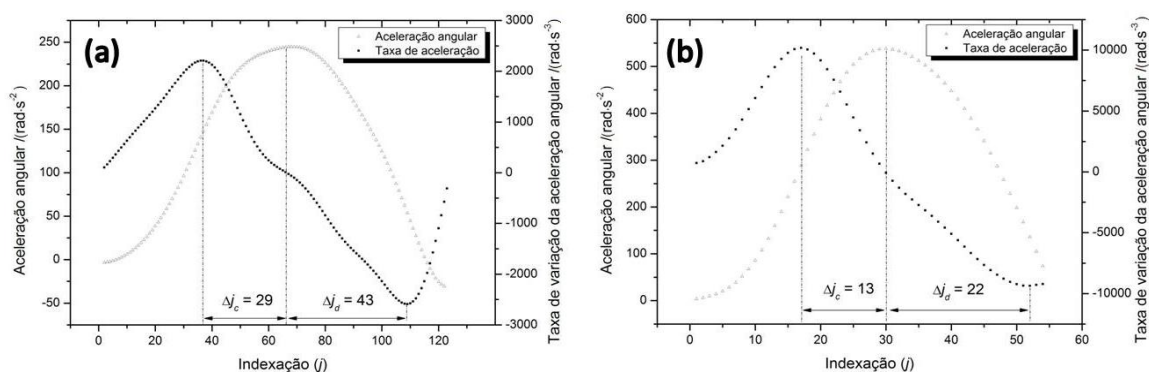


Figura 4.8 – Curva de taxa de variação da aceleração para os acionamentos (a) Ac#1 e (b) Ac#2.

Os trechos de maior e menor taxa de variação da aceleração correspondem aos pontos de inflexão nas curvas de aceleração e, a partir da distância entre esses pontos e o eixo de simetria, pode-se definir um parâmetro de avaliação um pouco mais quantitativo a respeito. As distâncias Δj_c e Δj_d determinadas respectivamente para os picos de taxa crescente e picos de taxa decrescente das curvas de aceleração quantificam essa simetria em incrementos da indexação. A fim de cruzar as informações de pico, taxa de variação e dispersão dos dados, a Tabela 4.6 mostra esses valores para os diferentes acionamentos.

Tabela 4.6 - Médias dos picos de aceleração, desvio padrão da média dos picos de aceleração, picos das taxas de variação da aceleração e correspondentes média e desvio padrão da média dos valores de aceleração em cada acionamento.

Aciona- mento	Pico de aceleração		Pico de Taxa Crescente				Pico de Taxa Decrescente			
	Média	Desvio padrão	Taxa de variação		Aceleração		Taxa de variação		Aceleração	
			Média	Δj_c	Média	Desvio padrão	Média	Δj_d	Média	Desvio padrão
$/(rad \cdot s^{-2})$	/ %	$/(rad \cdot s^{-3})$		$/(rad \cdot s^{-2})$	/ %	$/(rad \cdot s^{-3})$		$/(rad \cdot s^{-2})$	/ %	
Ac#1	243,36	0,12	2207	29	148,08	0,76	-2590	43	53,64	4,21
Ac#2	510,15	0,08	10172	13	288,9	2,92	-9366	22	136,14	4,30
Ac#3	612,95	2,91	9791	2	306,46	3,17	-11462	3	162,55	2,10
Ac#4	240,78	0,35	1976	5	126,29	0,96	-2252	7	70,45	8,00
Ac#5	203,06	0,17	1403	7	125,00	0,69	-1705	8	50,17	1,50
Ac#6	166,84	0,34	1008	7	102,91	0,83	-1076	11	35,66	7,00

Observa-se, pelas colunas Δj_c , que é comum aos acionamentos que o lado decrescente das curvas de aceleração tenha os dados mais afastados da linha de simetria passando pelo ponto de pico dessa curva e que os picos das taxas de variação da aceleração, embora estejam na mesma ordem de grandeza para ambos os lados da curva, ocorrem em instantes com valores de aceleração bem distintos.

Esse fato reforça a necessidade de que, ao se realizar a comparação entre os valores de torque medidos e de referência, as taxas de torque devam ser registradas e tomadas como um dos principais parâmetros que caracterizam o acionamento da comparação.

Ainda baseado nos dados da Tabela 4.6, pode-se concluir que, na região de pico, os valores de aceleração se apresentam menos dispersos em cada curva. Essa estabilidade é importante pois a avaliação na região do pico será muito importante na comparação entre os torques de referência e medido. Especificamente sobre o Ac#3, deve-se ressaltar a incompatibilidade entre os intervalos de tempo reais em que ocorrem o fenômeno e a taxa de aquisição utilizada. Neste caso, a taxa de aquisição de 50 Hz foi incapaz de descrever o fenômeno com fidelidade, como mostrado através dos altos valores de desvio padrão para os picos de aceleração e picos crescente da taxa de variação, o que compromete sua amostragem e avaliação. Nos acionamentos Ac#4, Ac#5 e Ac#6 foi utilizada essa mesma taxa, mas os resultados foram melhores por se tratar de um fenômeno ocorrendo de forma dinâmica com menores taxas de variação, ou seja, com t_a de 2 s.

De posse dos valores reais de aceleração calculados e do valor estimado para o momento de inércia de massa total ($\theta_{mot} + \theta_{eix}$) do eixo acionado (ver Tabela 4.2), é possível estimar os valores de torque e potência mecânica para cada acionamento. Para isso, utiliza-se a Equação 11⁸⁸, que reproduz a teoria do torque inercial originário do produto do momento de massa de inércia de um corpo pela aceleração angular desse corpo, e a Equação 12⁸⁸, que define a potência mecânica $P(i)$ como o produto entre o torque e a velocidade angular, estão resumidos na Tabela 4.7.

$$T_{tot}(i) = (\theta_{mot} + \theta_{eix}) \cdot \alpha(i) \quad (11)$$

$$P(i) = T_{total}(i) \cdot \omega(i) \quad (12)$$

Tabela 4.7 - Valores de máximo torque e máxima potência mecânica gerada no eixo.

<i>Acionamento</i>	<i>T_{total} (máximo)</i>	<i>P (máxima)</i>
	/ N·m	/ kW
<i>Ac#1</i>	56,56	16,447
<i>Ac#2</i>	125,88	36,632
<i>Ac#3</i>	141,86	42,079
<i>Ac#4</i>	56,43	16,445
<i>Ac#5</i>	47,43	11,318
<i>Ac#6</i>	38,77	7,153

Pode-se chegar a algumas conclusões a partir desta tabela, que considerou para o torque apenas os esforços gerados inercialmente no rotor do motor e no eixo de medição, composto pelo transdutor de torque e pelo acoplamento. O torque e a potência nominais do motor são respectivamente 40,46 N·m e 15 kW. Observa-se na Tabela 4.7 que os valores máximos atingidos para ambas as grandezas nos acionamentos são bem superiores aos valores nominais (ver Tabela 4.2), o que comprova experimentalmente a capacidade do conjunto motor e inversor em acionar eixo com regime de torque intermitente, alcançando inclusive valores acima de 300% do valor nominal. Importante lembrar que os torques máximos estão sendo alcançados somente no momento de pico e, por este motivo, o conjunto acionador conseguirá aplicá-los mas não conseguirá mantê-los constantemente.

Apesar destes altos valores de T_{tot} , que consideram o momento de inércia de massa de todo o eixo, o torque medido será aquele correspondente somente à porção mensurável do eixo, ou seja, trecho a jusante da seção instrumentada do sensor de torque em calibração, conforme explicado no capítulo 3.2. A depender das faixas de torque que se pretende aplicar ao transdutor durante sua calibração, a escolha de um motor com potência nominal compatível garantirá esses acionamentos sem maiores problemas.

4.1.3 Os valores de torque nos acionamentos

Os testes de acionamento no conjunto motor e inversor tiveram, num primeiro momento, o objetivo de caracterizar suas curvas de velocidade e aceleração, traçando o perfil das mesmas e avaliando sua aplicabilidade ao proposto para o padrão. Além disso, durante os acionamentos foram realizadas também as aquisições dos valores de torque no transdutor. Com um valor disponível de torque medido é possível realizar a avaliação do princípio físico de geração do torque inercial de referência, conforme definido na equação fundamental do princípio.

Porém, antes de confrontar os dois valores de torque, realizou-se uma avaliação quanto ao comportamento metrológico das curvas de dados do torque medido no transdutor em separado às respostas e resultados das curvas de aceleração e, conseqüentemente, dos torques de referência. Essa avaliação em separado das grandezas é importante pois, como será mostrado mais a frente, as características metrológicas de ambas grandezas terão contribuição também individual ao modelo metrológico que definirá a calibração, ou seja, as dispersões de cada grandeza constituem importante informação do sistema padrão e do instrumento em calibração, com reflexos na estimativa das incertezas de medição.

Durante os acionamentos, o canal de leitura do torque no *DAQ* foi ajustado para as mesmas taxas de aquisição utilizadas no canal de leitura dos valores de velocidade angular. Por se tratar de um sensor com princípio de funcionamento por circuito de ponte extensométrica, que trabalha com o equilíbrio e as variações da tensão elétrica neste circuito, as oscilações e ruídos estão mais presentes que nas leituras de velocidade, que são realizadas pelo método ótico discreto do encoder. Da mesma forma que para a velocidade, os dados originais de torque do sensor foram tratados *off-line* por um filtro tipo *FFT*, Bessel, passa-baixa com mesma frequência

de corte dos dados de velocidade, neste caso, 20 Hz. Utilizando a mesma frequência de corte para ambos os sinais evita-se o atraso de um sinal em relação ao outro em decorrência da filtragem

O valor de torque medido a ser usado deve, conforme Equação 13, corresponder à diferença entre o valor medido bruto durante a aplicação da aceleração e o valor de torque inicial, estimado como constante no patamar de velocidade constante. Este patamar deveria gerar um torque inercial nulo mas, devido aos resíduos de medição e instrumentação, o valor inicial de tara (T_{tz}) é considerado. Cada conjunto de n curvas, numa mesma sequência de acionamentos, terá um único valor de T_{tz} que deve ser debitado do valor bruto T_{tb} lido no transdutor para obtenção de cada valor de T_t da curva.

$$T_t(j, n) = T_{tb}(j, n) - T_{tz}(n) \quad (13)$$

Para a obtenção de T_{tz} são utilizados os valores medidos de torque no patamar anterior à curva de acionamento, em regime de velocidade inicial constante v_{ini} . Pela existência de oscilações mesmo após a filtragem a 20 Hz dos dados de torque no período total dos acionamentos, os dados de torque do patamar devem ser referenciados por um valor único, o qual pode ser obtido pela média desses dados, equivalente à aplicação de um filtro digital DC através da ferramenta de filtro Bessel passa-baixa e frequência de corte em 0 Hz. A Figura 4.9 mostra como exemplo a região de aplicação do filtro DC para obtenção do valor de T_{tz} da primeira rampa do Ac#2, neste caso o valor de -0,174 N·m.

Importante destacar que, no contexto da calibração, o procedimento apresentado na Figura 3.8 para obtenção do T_{ti} é um pouco diferente deste procedimento apresentado no tratamento da diferença de torques inerciais gerados pelo momento de inércia de massa inicial do eixo e aquele gerado a partir da colocação do corpo inercial de referência. Deve-se entender que, no procedimento da Figura 3.8, tanto T_t e T_{ti} devem ter passado por esse mesmo procedimento de débito de um valor de tara do sinal total medido.

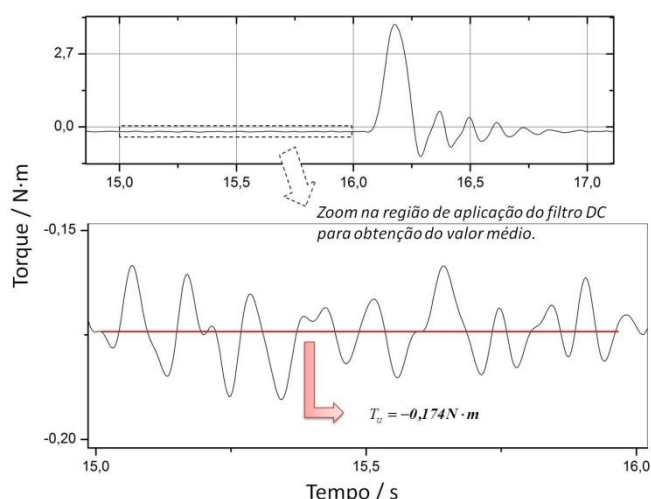


Figura 4.9 – Aplicação de filtro digital DC (FFT Bessel, passa baixa de frequência de corte igual a zero) no trecho que antecede a curva de torque gerada no acionamento Ac#2 para obtenção do valor inicial do torque medido T_{tz} .

A Figura 4.10 mostra as curvas com as médias dos torques medidos em cada acionamento e os desvios padrões relativos para quantificar a dispersão desses valores de torque entre as rampas. Fazendo uma comparação qualitativa entre a Figura 4.10 e a Figura 4.7 pode-se notar uma forte semelhança entre os comportamentos de torque e de aceleração não somente quanto aos perfis das curvas mas também quanto ao perfil de distribuição dos valores de desvio padrão das grandezas em cada índice j de cada acionamento, ou seja, assim como para os dados analisado de aceleração, os valores de torque se mostraram menos dispersos em determinada região da curva de torque, como nos valores próximos ao centro da curva, correspondendo ao pico de torque. No entanto, tomando-se o valor de desvio padrão da média dos picos de torque, como mostra a Tabela 4.8, observa-se que, em comparação às dispersões dos picos de aceleração (Tabela 4.6), as dispersões relativas do torque são maiores. Ainda sobre esta tabela, observa-se que, da mesma forma que ocorreu na análise das acelerações, para o torque medido no acionamento Ac#3, a configuração da taxa de aquisição comprometeu uma melhor avaliação do comportamento dos dados medidos. Com isso, o desvio padrão da média dos picos de torque correspondente alcançou um valor muito acima daqueles dos demais acionamentos.

Tabela 4.8 - Médias dos picos de torque e desvios padrões das médias dos picos de torque em cada acionamento.

Acionamento	Pico de torque medido	
	Média / N.m	Desvio padrão / %
Ac#1	1,802	0,64
Ac#2	3,980	0,43
Ac#3	4,720	2,95
Ac#4	1,797	0,51
Ac#5	1,509	0,58
Ac#6	1,223	0,66

As avaliações das taxas de variação do torque medido e do correspondente comportamento das dispersões dos valores de torque em função dos picos crescente e decrescente dessas taxas não serão demonstradas individualmente, como foi realizado para a aceleração, sendo mais produtiva a inclusão dessas análises nas próximas abordagens que avaliam comparativamente os valores de torque medido e os valores do torque de referência.

4.1.4 O torque medido e o torque de referência (comparação direta)

Para uma primeira verificação dos acionamentos, define-se que o perfil das curvas de torque medido deve seguir o mesmo traçado das curvas de aceleração, conforme a teoria reproduzida na Equação 2 que orienta a proposta de medições para a calibração. Embora esse comportamento já possa ser observado na comparação proposta no capítulo 4.1.3, entre a Figura 4.10 e a Figura 4.7, este capítulo já trata da abordagem para obtenção do torque de referência e sua eventual comparação ao torque medido pelo transdutor, respectivamente T_{ir} e T_{tl} .

Segundo o manual do fabricante do transdutor de torque⁹⁰, a porção mensurável do sensor, ou seja, aquela a jusante da seção instrumentada corresponde a 60% do momento de inércia de massa total do sensor ($\theta_{tra(60\%)}$), o que equivale a um valor de 0,00792 kg·m². Importante destacar aqui que este valor de $\theta_{tra(60\%)}$ não apresenta uma confiabilidade metrológica de rastreabilidade, ou seja, não é um dado proveniente de calibração do sensor ou procedimento parecido.

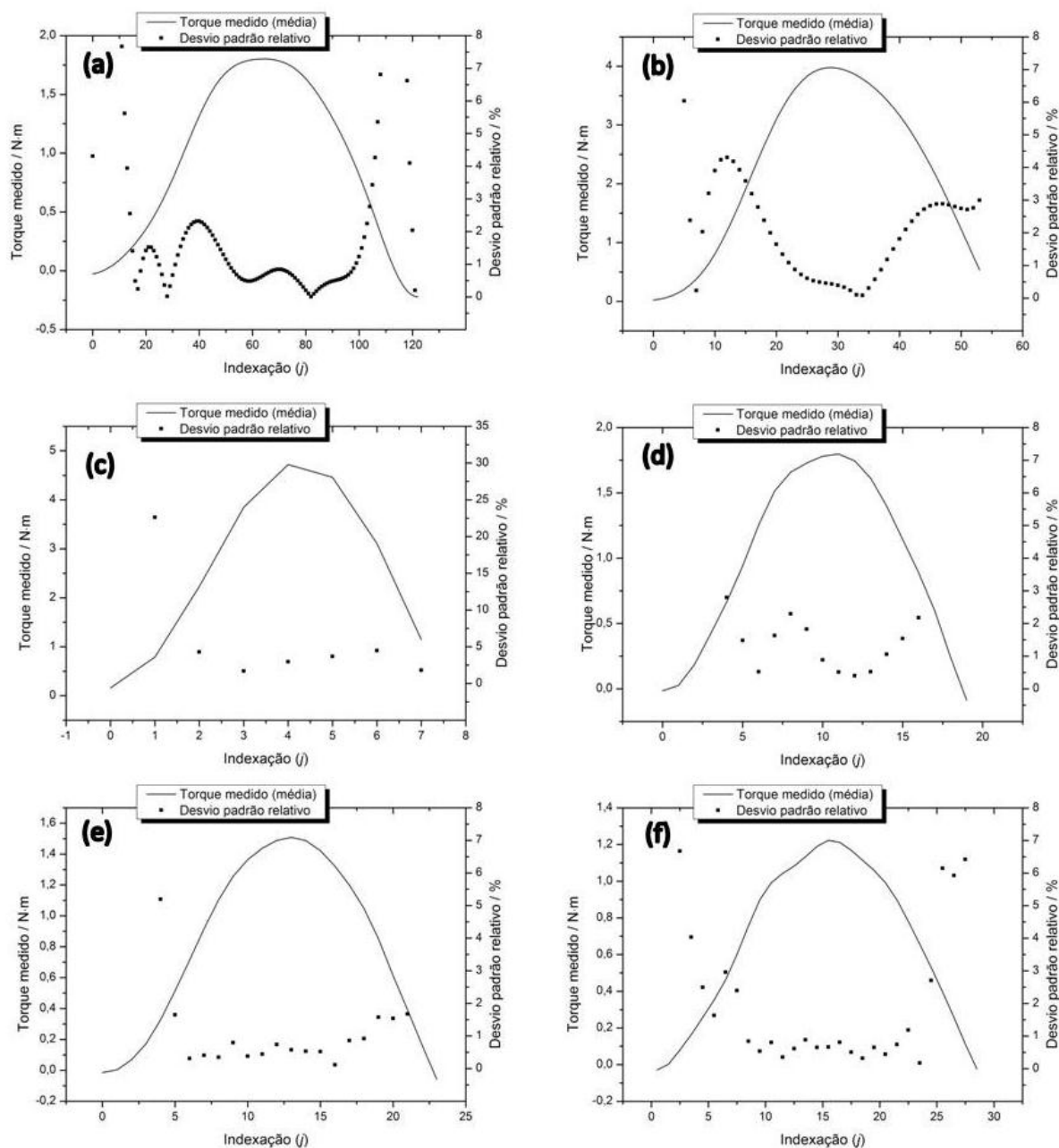


Figura 4.10 - Curvas de média dos torques medidos e desvios padrões relativos para as configurações de acionamento: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5, (f) Ac#6.

Porém, para este estudo, este dado serve de referência nominal à demonstração do princípio físico sob a regência de uma referência real de inércia, mesmo que esta não tenha um valor de erro ou incerteza atribuído.

Como este será o único elemento inercial contribuindo para as cargas de torque que a seção instrumentada do sensor irá sofrer, a multiplicação deste valor pelos dados de aceleração angular calculados vão gerar os valores de torque inercial de referência para estes acionamentos. Como neste teste não existem

momentos de inércia de massa iniciais, o torque T_{tl} corresponderá diretamente ao torque inercial de referência indexado calculado pela Equação 14.

$$T_{ir}(i) = \theta_{tra(60\%)} \cdot \alpha(i) \quad (14)$$

A Figura 4.11 mostra, a título de ilustração do princípio, as curvas de torque de referência e do torque medido para duas rampas nos acionamentos Ac#1 e Ac#2.

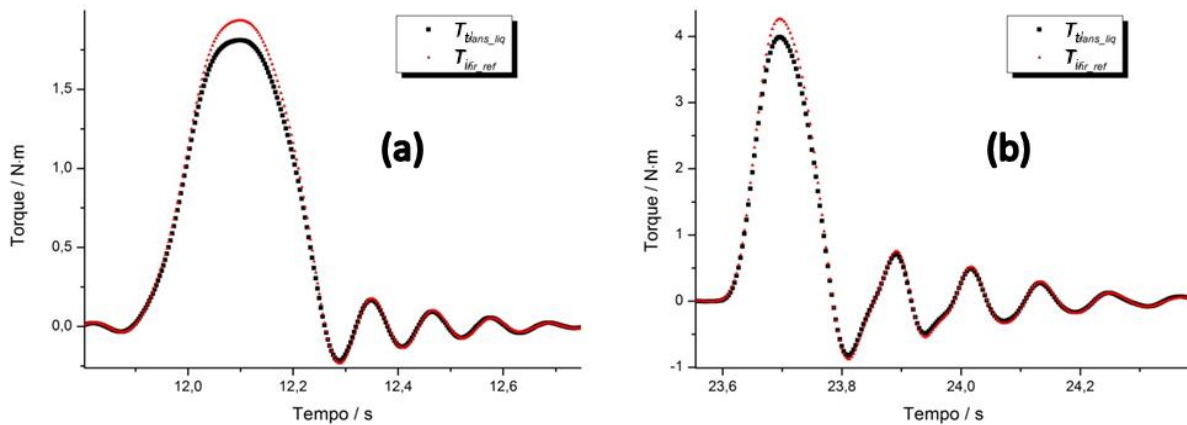


Figura 4.11 - Trechos dos acionamentos com as curvas de torque medido (T_{tl}) e torque de referência (T_{ir}) para os acionamentos (a) Ac#1 e (b) Ac#2

É notável a convergência das curvas, quando ambos valores de torque seguem a mesma trajetória e permitem uma conclusão, ainda que parcial, sobre a boa aplicabilidade do princípio físico adotado para o cálculo de T_{ir} . Avançando um pouco mais a análise, nestes gráficos deve-se observar que existem diferenças entre os valores, o que fica mais evidente, no campo visual, na região de pico das curvas. Estas diferenças correspondem ao erro de medição que, como já foi explicado anteriormente no capítulo 3.3, é um dos principais parâmetros a serem determinados pelo método de calibração proposto nesta tese. Sua quantificação pode ser feita através da comparação individual e direta entre as médias dos valores indexados de torque medido e as médias dos valores indexados de referência das três curvas e em cada carregamento, obtidos das Equações 15, 16 e 17 a seguir.

$$T_{ir}(j, n) = \theta_{t(60\%)} \cdot \alpha(j, n) \quad (15)$$

$$\bar{T}_{ir}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{ir}(j, n) \quad (16)$$

$$\bar{T}_{tl}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{tl}(j, n) \quad (17)$$

O erro de medição determinado pela diferença entre os valores medidos de torque no transdutor e os valores estimados do torque de referência pode ser reeditado na Equação 18 para as médias desses valores nos pontos indexados em cada acionamento, calculados relativamente aos valores de referência.

$$E(j) = \frac{(\bar{T}_{tl}(j) - \bar{T}_{ir}(j))}{\bar{T}_{ir}(j)} \cdot 100 \quad (18)$$

Os gráficos da Figura 4.12 mostram os comportamentos desse parâmetro $E(j)$ relativo ao longo das curvas de torque nos vários acionamentos. Com exceção do gráfico referente ao acionamento Ac#3 (Figura 4.12.c), que mais uma vez mostrou resultados muito discrepantes dos demais acionamentos, é possível observar que, assim como nas avaliações das dispersões das grandezas torque medido e aceleração, pode-se observar uma região de tendência de $E(j)$, ou seja, a região mais próxima ao pico da curva de torque corresponderá também à região onde $E(j)$ tem maior estabilidade, mostrando quase um patamar.

Nos acionamentos Ac#1 e Ac#2, com respectivas Figura 4.12.a e Figura 4.12.b, há a tendência de um leve crescimento de $E(j)$ a medida que o acionamento avança no tempo. Nos demais acionamentos essa tendência de aumento do parâmetro não pôde ser observada tão facilmente, mas também é demonstrada.

Como parte dessas análises, a Tabela 4.9 mostra os valores de $E(j)$ referentes aos pontos de pico de torque das curvas.

A tendência de aumento de $E(j)$ em cada curva demonstra não somente uma diferença nominal entre os dados, o que deveria gerar um erro percentual constante entre os dados caso fosse a única contribuição, mas também uma dependência temporal no comportamento dos sinais durante o período do acionamento.

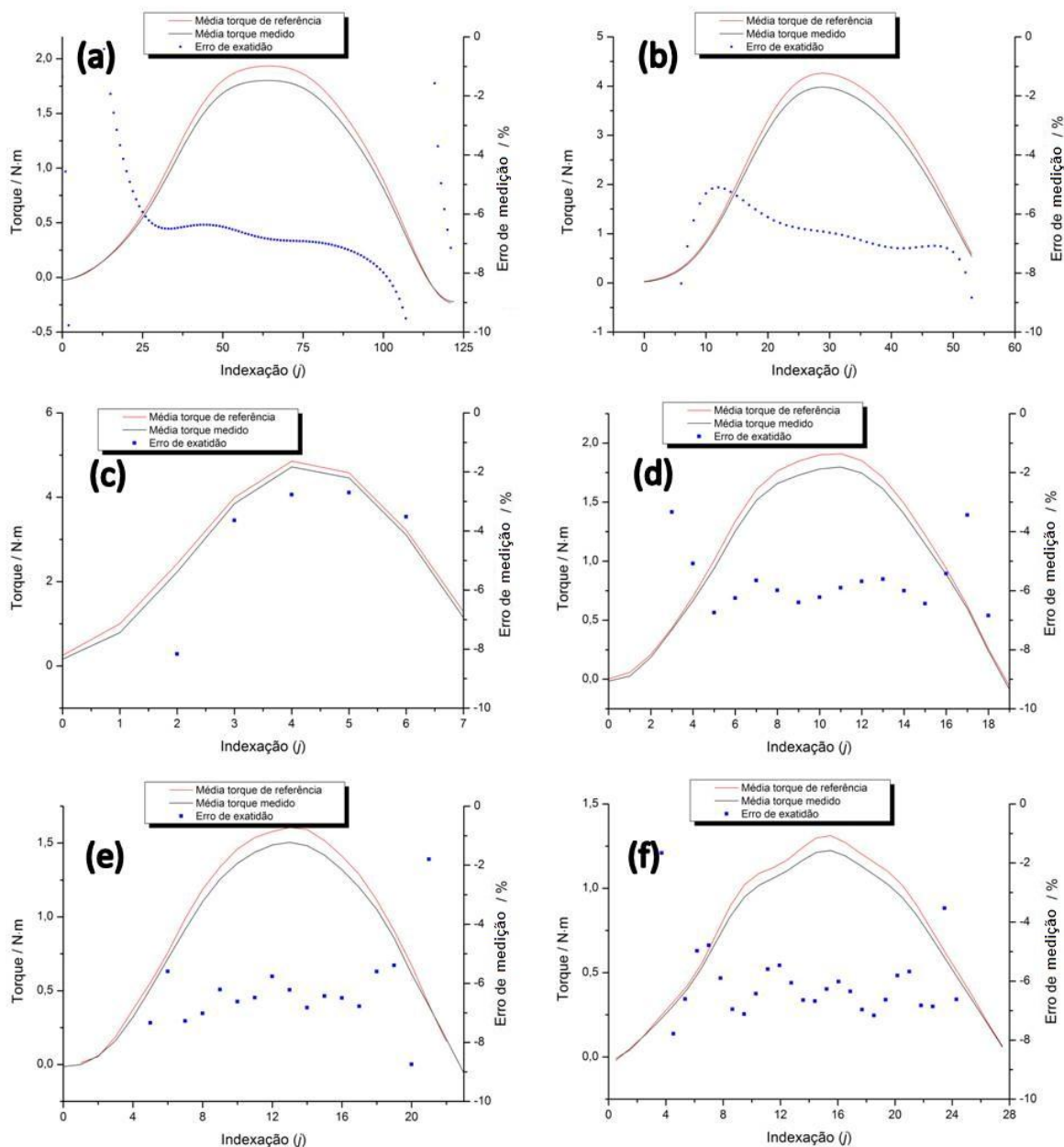


Figura 4.12 –Valores médios de torque para T_{tl} e T_{ir} e os erros de medição (E) em cada acionamento: (a) Ac#1, (b) Ac#2, (c) Ac#3, (d) Ac#4, (e) Ac#5, (f) Ac#6.

A demonstração dessa dependência temporal para o comportamento dos sinais de torque durante o período determinado do acionamento vem exatamente de encontro ao que está proposto como objetivo da tese, ou seja, seguindo a metodologia de medição, esses resultados mostram valores de erro que estão rastreáveis dinamicamente e podem sim ser considerados caracterizadores de um sensor sob aquelas condições de carregamento.

Tabela 4.9 - Erro de medição das médias dos sinais de torque.

Acionamento	Erro de medição
	$E(j)$ no pico / %
Ac#1	-6,85
Ac#2	-6,60
Ac#3	-2,77
Ac#4	-5,90
Ac#5	-6,22
Ac#6	-6,68

Ainda conforme proposto no capítulo 3.3, a formatação de uma matriz de parâmetros que realize o mapeamento de determinados pontos de torque selecionados da faixa nominal, que apareçam nas várias configurações de acionamentos, aprimora a análise direta da exatidão da grandeza, condicionando cada comportamento de erro a uma condição de acionamento e medição. Como exemplo, dos acionamentos realizados nestes experimentos pode-se focar alguns pontos de torque e destacar os pareamentos.

Os valores medidos do torque não são exatamente iguais aos valores nominais selecionados para o mapeamento do ponto, devido à dinâmica da aplicação dos carregamentos e da inexistência da estabilização em um ponto nominal de referência, mas devem ser valores próximos e dentro de uma faixa de correspondência com comportamentos equivalentes, o que foi demonstrado nas avaliações de estabilidade e dispersão das medições durante estes acionamentos. A Tabela 4.10 e a Tabela 4.11 mostram o mapeamento dos pontos nominais 1,5 N·m e 1,7 N·m respectivamente.

Tabela 4.10 - Parâmetros do ponto de 1,5 N·m.

Acionamento	Valor torque medido	Intervalo entre leituras	Erro de medição	Taxa de variação do torque medido	Desvio padrão torque medido
	/ N·m		/ %	/ (N·m·s ⁻¹)	/ %
Ac#1	1,499	0,13	-6,36	12	2,01
	1,517		-7,05	-10	0,17
Ac#2	1,426	0,12	-5,15	70	4,18
	1,459		-7,16	-70	2,80
Ac#4	1,515	0,14	-5,66	10	1,63
	1,506		-5,80	-10	0,75

Tabela 4.11 - Parâmetros do ponto de 1,7 N·m.

<i>Acionamento</i>	<i>Valor torque medido</i> / N·m	<i>Intervalo entre leituras</i> / s	<i>Erro de medição</i> / %	<i>Taxa de variação do torque medido</i> / (N·m·s ⁻¹)	<i>Desvio padrão torque medido</i> / %
<i>Ac#1</i>	1,706	0,09	-6,46	6	1,01
	1,700		-6,93	-6	0,50
<i>Ac#2</i>	1,663	0,11	-5,25	72	3,93
	1,685		-7,10	-66	2,85
<i>Ac#4</i>	1,729	0,06	-6,40	3,5	1,82
	1,746		-5,68	-4,5	0,40

Em cada acionamento um mesmo valor de torque pode ser observado duas vezes, ou seja, quando no lado crescente da curva ou quando no lado decrescente desta. Se as taxas de variação de torque se mantêm em ambos os lados, logicamente que invertidos os sinais, a avaliação de histerese dinâmica do processo de medição pode ser realizada diretamente. Valores mais altos da taxa de variação, que correspondem aos pontos fora da faixa de pico de torque, resultaram numa maior diferença entre os valores de erro de indicação para o mesmo ponto de torque da faixa. Para o acionamento *Ac#1* por exemplo, na Tabela 4.10 o valor de torque avaliado de 1,5 N·m, que está afastado do valor de pico de 1,8 N·m para aquele acionamento, reflete uma diferença entre os erros de medição em ambos os lados da curva menor que para o ponto de torque de 1,7 N·m, objeto de avaliação da Tabela 4.11. Já para o acionamento *Ac#2*, ambas as tabelas se referenciam a pontos de torque relativamente afastados da zona de pico, com altas taxas de variação da grandeza, o que reflete na manutenção das diferenças entre os erros de indicação do lado crescente e do lado decrescente das curvas.

Esta forma de avaliação direta restringe a interpretação do sensor aos pontos de torque selecionados, ao mesmo tempo em que, se aplicada a uma demanda também específica do usuário, que pode mapear as principais influências rastreáveis a que este valor medido do torque estiver sujeito de forma independente à análise da curva de acionamento. Naturalmente, quanto mais variações de acionamentos puderem ser aplicadas, maior será essa matriz de correspondências com mais variações dos parâmetros característicos.

4.1.5 O torque medido e a aceleração medida (comparação indireta)

No capítulo 3.3 é introduzida uma proposta mais simples para a denominada avaliação indireta dos dados, ou seja, utilizando não mais a comparação entre dois valores de torque, mas a relação de linearidade entre as grandezas T_t e α . A avaliação indireta se refere ao tratamento gráfico dos dados, o que deve ser implementado através de softwares adequados de cálculo. Considerando a relação teoricamente linear do princípio físico adotado, em um gráfico de eixos α versus T_{tra} que contemple todos os dados pareados das curvas, é possível aplicar um ajuste linear onde, na determinação da equação de interpolação de 1ª ordem o parâmetro "a" de inclinação da reta (Equação 19) representará fisicamente o momento de inércia de massa θ_s daquela curva ou do acionamento a que se refere, como mostra a Equação 20. Uma vantagem do método é considerar os dados de T_{tb} ao invés de T_t , que necessitaria da determinação do torque de tara T_{tz} . A curva linear passa a cortar o eixo do torque em "b" enquanto a aceleração é nula. Como o parâmetro principal avaliado é a inclinação "a", o valor de "b" da equação deve ser desprezado.

$$y = a \cdot x + b \quad (19)$$

$$T_t = \theta_s \cdot \alpha \quad (20)$$

A Figura 4.13.a mostra, para os acionamentos Ac#1 e Ac#2, a relação linear entre os dados com os respectivos θ_s calculados.

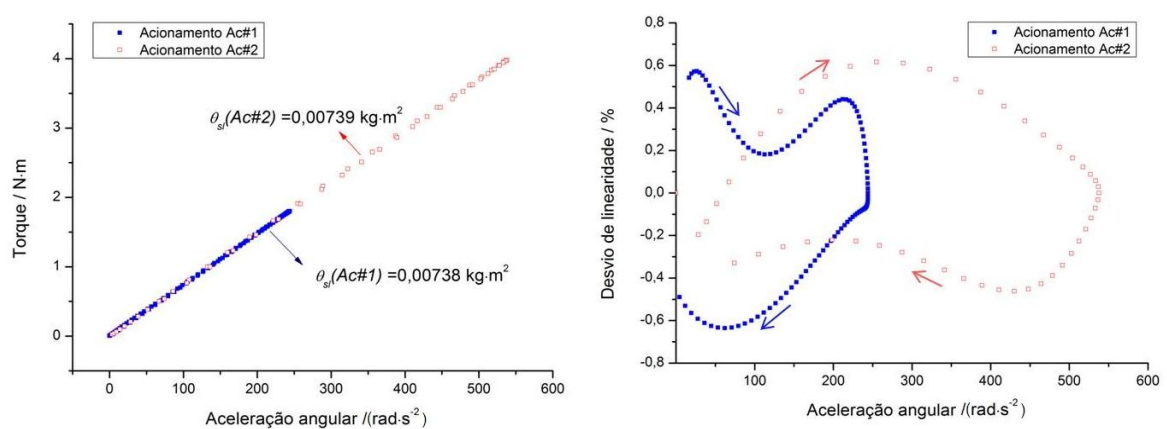


Figura 4.13 – (a) Relação linear entre α e T_{tl} e (b) desvio relativo de linearidade nos acionamentos Ac#1 e Ac#2.

Como na bancada #1 não foram utilizados momentos de inércia de massa acoplados ao eixo, não existe o acionamento com o eixo em configuração de inércia θ_i , para determinação de um valor T_{ti} . Neste caso os valores de T_{tb} se equivalem a T_{tl} vão gerar a inclinação θ_s correspondente a θ_r .

Essa avaliação é visualmente interessante pois mostra um resultado bem abrangente dos acionamentos. Em aplicações com a variação do corpo inercial de referência, será possível traçar em um mesmo gráfico as diversas curvas de interpolação e com isso criar uma "malha visual" de fácil percepção e avaliação dos dados inseridos.

A avaliação gráfica da relação entre as grandezas não permite porém que sejam identificadas ou relacionadas de imediato as características de taxas de variação das grandezas. Mas um aprofundamento na análise desses dados gráficos permitirá a avaliação de desvio de linearidade em todo o domínio de aceleração aplicado.

A Figura 4.13.b mostra os resíduos do ajuste linear em toda extensão da curva de acionamento relativos ao ponto máximo. Observa-se que este gráfico se assemelha aos gráficos de histerese da Figura 2.12. Para facilitar a compreensão e comparação qualitativa, as setas indicam o caminho percorrido pelos dados.

A apresentação conjunta das curvas de ajuste de diferentes acionamentos sob um mesmo momento de inércia, ou seja, a indicação de um valor de θ_s que possa ser comparado a um valor de θ_r , disponibiliza uma análise externa do acionamento. Já o gráfico com os resíduos pressupõe uma análise intrínseca deste carregamento, sem a existência de uma referência externa comparativa. Ambas análises constituem uma ferramenta interessante para compor um resultado de calibração, onde um contexto englobando simultaneamente as duas grandezas deve ser mantido mesmo sem entrar em detalhes de comportamentos individuais ou regionais dessa relação. Nos testes da bancada #2 este método de comparação indireta poderá ser retomado, com a abordagem para a variação das inércias acionadas.

4.1.6 Considerações sobre os resultados parciais

Os testes dos acionamentos tiveram a intenção de apresentar e identificar o comportamento do conjunto motor e inversor quanto às curvas reais de velocidade e

aceleração angulares aplicadas ao eixo. Essas curvas puderam ser testadas sob um viés metrológico, com a avaliação de sua repetibilidade e a comparabilidade nominal e comportamental sob várias configurações.

De uma forma geral e considerando as avaliações parciais, qualitativas e quantitativas apresentadas no decorrer do texto, pode-se concluir que o acionamento realizado com motor AC e inversor de frequência constitui um conjunto com boa capacidade para aplicar curvas de aceleração com perfil semelhante àquele apresentado na teoria proposta e com resultados de repetibilidade interessantes que, no entanto, se mostraram mais estáveis em algumas regiões da curva que em outras. A estabilidade nos valores de aceleração reflete diretamente a estabilidade nos valores de torque de referência, o que deve ser tomado em conta na questão da avaliação dos comportamentos de torque através das várias regiões selecionáveis de cada curva.

Os limites de tempo de aceleração e intervalos de velocidade devem ser sempre testados de forma a extrair as melhores e mais abrangentes condições de acionamento do conjunto, como picos de torque e taxas de variação da grandeza.

Questões sobre os procedimentos de aquisição e tratamento dos dados já se mostram importantes e com influência nos resultados. Algumas questões sobre este tema foram avaliadas sob o foco de abrangência dos regimes propostos, ou seja, de posse das características reais dos regimes e das demandas de medição da calibração, pose-se avaliar como determinados parâmetros de processamento de dados podem influenciar os dados finais de velocidade, aceleração e torque a serem considerados.

Da mesma forma, o número mínimo de repetições dos acionamentos sob uma mesma configuração de acionamento deve ser melhor avaliado pois, em conjunto com as limitações da taxa de aquisição selecionada, alguma dificuldade foi encontrada para sincronizar as rampas de aceleração, problema que poderá ser melhor balizado com maior número de medições e maior resolução das curvas.

Os métodos propostos para a consideração dos dados medidos de torque talvez não devam ser interpretados separadamente, no intuito de alcançar um resultado que represente a calibração e faça uma relação direta entre o procedimento de medição e as possibilidades de carregamento, embora tenham abordagens diferentes. Isto significa que, baseado nas formas propostas, não seria sobrecarga de informação que por exemplo, dois métodos de interpretação dos

resultados fossem apresentados e compusessem conjunta e complementarmente o conteúdo de um relatório de calibração.

Estas conclusões parciais corroboram a utilização do princípio físico do torque inercial na geração de uma grandeza de referência a ser utilizada na calibração dinâmica do mensurando torque. O capítulo 4.2 trata da ampliação dessa interpretação e da avaliação das metodologias de medição e do carregamento apresentadas na Figura 3.8 e na Figura 3.9, considerando outras partes do procedimento de medição, como a metodologia de acoplamento dos corpos inerciais de referência, avaliações quanto às influências e restrições da montagem do sistema mecânico.

A concatenação entre as avaliações obtidas dos experimentos e a realimentação das propostas teóricas, definirá por fim um modelo metrológico representativo do mensurando e conseqüentemente da calibração. Daí então são desenvolvidos os conceitos de incerteza de medição e de um procedimento final de calibração com a apresentação de resultados.

4.2 A Bancada experimental #2

A proposta e projeto para a bancada #2 foram desenvolvidos a partir dos bons resultados alcançados nos testes de acionamento da bancada #1 com o conjunto motor elétrico e inversor. O objetivo é então evoluir nos experimentos a fim de testar e validar as propostas relativas à metodologia de medição utilizando uma montagem mecânica mais complexa, com mancais de suporte e discos de inércia a serem acoplados ao eixo girante.

O desenho da bancada #2 segue a ideia principal com os componentes básicos, como idealizado na Figura 3.6. A Figura 4.14 mostra o esquema representativo dos elementos na montagem da bancada #2 com uma vista parcialmente explodida separando os conjuntos de montagem. A descrição detalhada dos componentes se encontra no Apêndice B.2.

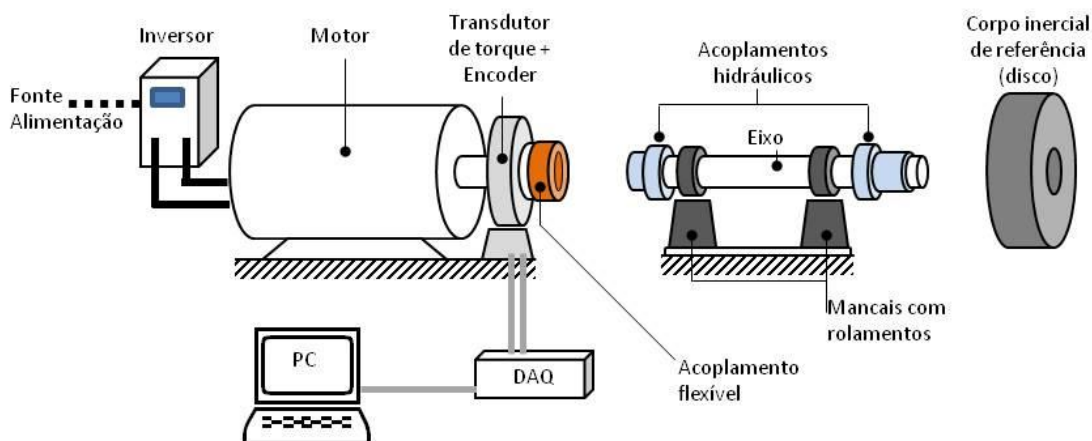


Figura 4.14 – Vista representativa dos elementos da bancada #2, parcialmente explodida entre as partes conectáveis.

O segundo conjunto da montagem da Figura 4.14, contempla o eixo projetado para transmissão do torque de referência com acoplamentos e mancais selecionados. A terceira porção desta montagem se refere ao corpo inercial de referência a ser utilizado, que no caso será um conjunto de discos intercambiáveis de acordo às capacidades nominais de torque ou de taxa de variação de torque que se pretenda alcançar.

Os itens a seguir realizam a sequência de estudos e projeções para as capacidades pretendidas nos acionamentos testes da bancada e como se desenvolveram os projetos e seleções dos componentes.

A faixa de torque a ser trabalhada foi definida para um máximo de 15 N·m. As taxas de variação do torque não podem ser precisamente estimadas sem um melhor conhecimento do perfil de aceleração real dos acionamentos, mas tomando como base os perfis das curvas alcançados na bancada #1, pode-se trabalhar com possíveis taxas de variação do torque na ordem de 10 N·m·s⁻¹ a 20 N·m·s⁻¹.

4.2.1 Componentes estruturais

Simultaneamente à necessidade de se criar um *setup* de teste dos conceitos metodológicos da calibração dinâmica e do princípio físico adotado, os componentes selecionados também estão sendo avaliados quanto a sua aplicabilidade no projeto final de um sistema de calibração. Isto significa que, embora os resultados tenham uma projeção maior para a validação do método de calibração proposto, aqueles resultados parciais ou finais dos testes que estejam diretamente ligados aos

equipamentos e suas influências no método, devem ser observados e anotados como restrição ou orientação ao projeto principal que derive deste estudo.

A estrutura básica da bancada #2 é formada pelo eixo de transmissão do torque do disco até o transdutor. As conexões são realizada principalmente por acoplamentos hidráulicos, que são elementos muito usados para este tipo de conexão eixo/furo de elementos mecânicos com alta precisão de alinhamento e ao mesmo tempo praticidade na sua montagem e desmontagem. As características estruturais do eixo e dos principais elementos de conexão e suporte com os mancais e rolamentos, estão descritos nos Apêndice B.5 e B.6. Especificamente sobre os mancais, o torque de atrito teórico é calculado para o modelo selecionado e as condições de carregamento do eixo. Este torque é importante pois caracteriza uma carga parasita à medição e sua quantificação serve para uma futura correção.

Ainda sem os dados de aceleração da bancada #2, mas com as restrições de velocidade e torque, o projeto da estrutura foi tomado de forma mais conservadora, projetando valores máximos de aceleração angular atingindo $200 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$, em um intervalo de 500 rpm ($52,36 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$), o que equivaleria, segundo experiência obtida com a bancada #1, a um t_a de 2,0 s. Num exercício inicial de projeção de valores atingíveis de aceleração, a Tabela 4.12 faz uma relação simples entre uma faixa de momentos de inércia de massa e os respectivos valores de pico de torque a serem encontrados sob determinadas acelerações angulares máximas atingidas no acionamento.

Tabela 4.12 - Relação de aceleração e momentos de inércia de massa dos discos de referência.

Inércia θ / $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	Aceleração máxima / ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$)		
	100	150	200
	Torque máximo / $\text{N}\cdot\text{m}$		
0,05	5,00	7,50	10,00
0,04	4,00	6,00	8,00
0,03	3,00	4,50	6,00
0,02	2,00	3,00	4,00
0,01	1,00	1,50	2,00

Considerando a forma geométrica básica do disco, com diâmetro interno D_i e diâmetro externo D_e e massa M_d , o momento de inércia de massa θ_d aproximado pode ser calculado pela Equação 21⁴⁶. A massa do disco obviamente dependerá das

dimensões deste e de sua massa específica. Considerando além dos diâmetros uma espessura h do disco e a massa específica ρ do material, a massa do disco poderá ser calculada conforme Equação 22 ⁴⁶.

$$\theta_d = \frac{M_d \cdot (D_e^2 + D_i^2)}{8} \quad (21)$$

$$M_d = \frac{\pi \cdot (D_e^2 - D_i^2)}{4} \cdot \rho \cdot h \quad (22)$$

Com essas duas equações, é possível estimar o valor de momento de inércia de massa aproximado para os discos. Considerando o fato de que o diâmetro interno do disco deva coincidir com o diâmetro da parede de contato externa do acoplamento hidráulico, este valor comum será 0,038 m. De modo a facilitar o processo de usinagem e padronizar as dimensões, o valor de diâmetro externo dos discos foi fixado em 0,200 m e as espessuras variando em valores arredondados. Considerando como material base um aço comum (AISI 1020), a massa específica ρ será $7900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. A Tabela 4.13 exemplifica os discos com as geometrias variadas e seus valores de massa e momento de inércia de massa alcançados.

A partir desta tabela e com o auxílio da ferramenta computacional CAD (SolidWorks[®]), o projeto dos discos já pode considerar a necessidade de igualar a área interna de contato do disco com a área externa de contato do acoplamento hidráulico. A Figura 4.15 mostra o projeto dos discos considerando a área interna de contato com o acoplamento hidráulico através da inclusão de uma parede interna. O diâmetro externo, que tem maior influência na estimativa do momento de inércia de massa da peça, foi mantido em 200 mm e a espessura h pode então variar sob essa geometria. Os valores de θ_{d_CAD} recalculados pelo software CAD estão mostrados na última coluna da Tabela 4.13. Os valores se alteram pouco e para o disco D40 não existe diferença pois ele já tem a espessura igual ao comprimento da parede do acoplamento.

A Figura 4.15.c mostra como fica a conexão do eixo com o disco utilizando o acoplamento hidráulico. Os discos foram então fabricados (Figura 4.16) a partir destas dimensões nominais e considerando as especificações de tolerância para encaixe com o acoplamento hidráulico (Figura B.6).

Tabela 4.13 - Dimensões básicas dos discos e os valores calculados de massa e momento de inércia de massa.

Identificação do disco	D_e / m	D_i / m	h / m	ρ / (kg·m ⁻³)	M_d / kg	θ_{d_calc} / kg·m ²	θ_{d_CAD} / kg·m ²
D40	0,200		0,040		9,569	0,04957	0,04957
D30	0,200	0,038	0,030	7900	7,177	0,03718	0,03723
D20	0,200		0,020		4,785	0,02479	0,02489
D10	0,200		0,010		2,392	0,01239	0,01254

Valores nominais em mm

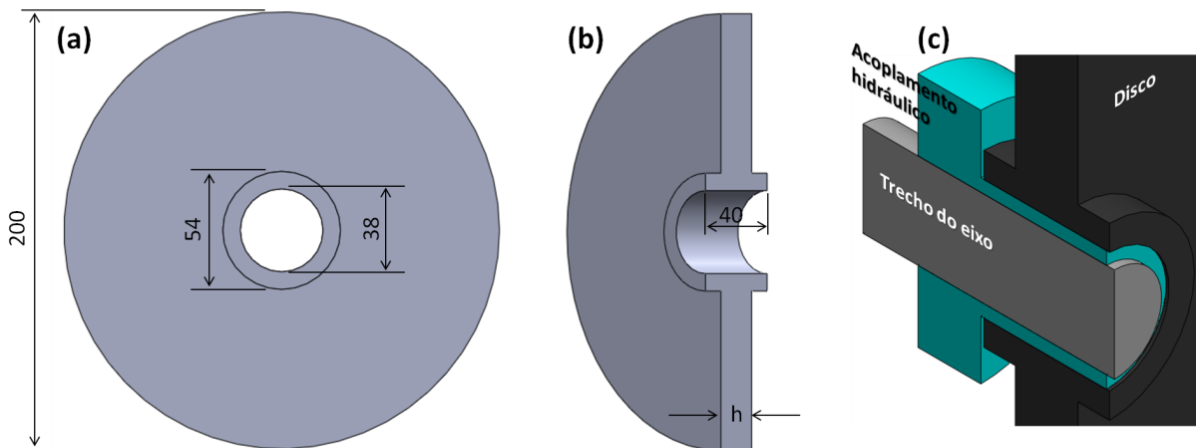


Figura 4.15 – (a) Vista frontal do disco de inércia; (b) Vista em corte mostrando as dimensões de espessura; (c) Vista da montagem com o acoplamento hidráulico e o eixo de transmissão.

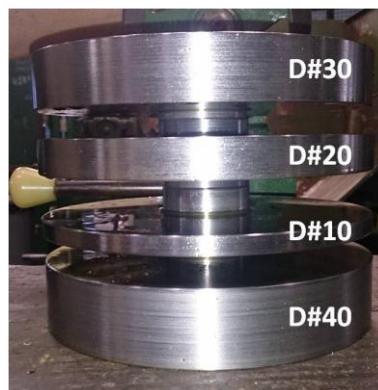


Figura 4.16 – Discos fabricados.

A Figura 4.17 mostra três configurações de inércia: (a) sem disco (SD); (b) disco D20; (c) disco D40.



**Figura 4.17 – Montagens com as configurações:
(a) sem disco; (b) disco D20; (c) disco D40.**

4.2.2 Pré-testes para os acionamentos

Além dos experimentos visando a validação das metodologias de carregamento e calibração propostas, outro objetivo importante da bancada #2 é exatamente a identificação de componentes estruturais que venham interferir ou restringir as capacidades de acionamento de um padrão primário gerador do torque de referência. Após a montagem dos componentes do eixo, a realização de testes preliminares aos experimentos é importante para identificar os elementos e as reações da bancada que sejam restritivos ou até mesmo que inviabilizem os acionamentos.

Não houve nesta segunda etapa de testes de acionamento uma preocupação em se determinar as faixas de tempo de aceleração aceitáveis para o conjunto motor e inversor, pois o foco passa a ser a metodologia de medição e detalhes a respeito de aquisição e tratamento de dados. Obviamente, no procedimento de caracterização de um sistema de calibração padrão, as capacidades de aceleração possíveis do conjunto acionador devem ser determinadas e de certa forma interferir na restrição das capacidades nominais.

Os relatos dos testes estão mostrados em maiores detalhes no Apêndice C e separados em blocos de diferentes temas de análise, com os destaques a seguir:

a) *testes do controle e da cadeia de medição*: o sincronismo entre os sinais de torque e aceleração foi avaliado e verificou-se uma defasagem entre os sinais. As causas foram avaliadas e os sinais sincronizados manualmente.

b) *teste de vibrações (identificação de frequências naturais)*: foram apresentadas as formas de cálculo, modelagem e teste experimental para identificar

frequências naturais em montagens semelhantes a da bancada #2. Resultados para a bancada e outras simulações estão apresentados.

c) *testes de atrito*: foi verificado o torque de atrito gerado pelos mancais comparando-o ao torque teórico calculado para o tipo de rolamento utilizado. Foi avaliada a condição sistemática desse torque de atrito para que fosse considerado no torque de tara daqueles acionamentos.

4.2.3 Testes para a metodologia de calibração

No que se refere à validação da metodologia de calibração, as interpretações das medições de torque não poderão se aprofundar em termos de precisão, como para cálculos de repetibilidade e desvios, devendo ser balizadas nas ordens de grandeza dos parâmetros medidos e calculados. No entanto, o cerne de avaliação da metodologia de calibração, com o tratamento dos dados a partir da variação de discos de inércia em diferentes acionamentos no eixo, poderão ser realizados e os resultados demonstrados comprovarem a boa aplicabilidade dos métodos propostos, até mesmo utilizando os valores de aceleração atingidos.

Foi realizada uma sequência de acionamentos a fim de demonstrar a boa aplicabilidade da metodologia de medição para a obtenção dos valores comparáveis de torque, como projetado na sequência proposta na Figura 3.8.

Um valor alvo de tempo de aceleração foi determinado para 3,0 s e um degrau de velocidade definido entre os valores $104,72 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e $157,08 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, 1000 rpm e 1500 rpm respectivamente.

Os acionamentos foram realizados com três configurações de discos, sendo uma com apenas o eixo e acoplamento hidráulico, outra com o disco D20 e a última com o disco D40, o que correspondem aos respectivos momentos de inércia de massa θ_{i2} , $\theta_{r(D20)}$ e $\theta_{r(D40)}$ conforme as descrições e a metodologia apresentadas no capítulo 3.2.

Os resultados a seguir representam os testes realizados na bancada #2 e trazem, de uma forma geral, a melhor apresentação da metodologia de calibração. As informações apresentadas trazem as interpretações complementares aos testes realizados na bancada #1. A metodologia de calibração envolve principalmente a variação das inércias e como conjugar essas variantes dentro das propostas de estudo e avaliação de um resultado de calibração.

4.2.3.1 Avaliação da repetibilidade nas configurações de inércia

Assim como foi realizado nos ensaios da bancada #1, os acionamentos da bancada #2 puderam ter as suas estabilidades avaliadas através da análise do desvio padrão em cada curva de aceleração nas diferentes configurações de inércia. A Figura 4.18 mostra as curvas médias de aceleração e os desvios padrões distribuídos ao longo das curvas de acionamento para as configurações de carga sem disco, com disco D20 e com disco D40.

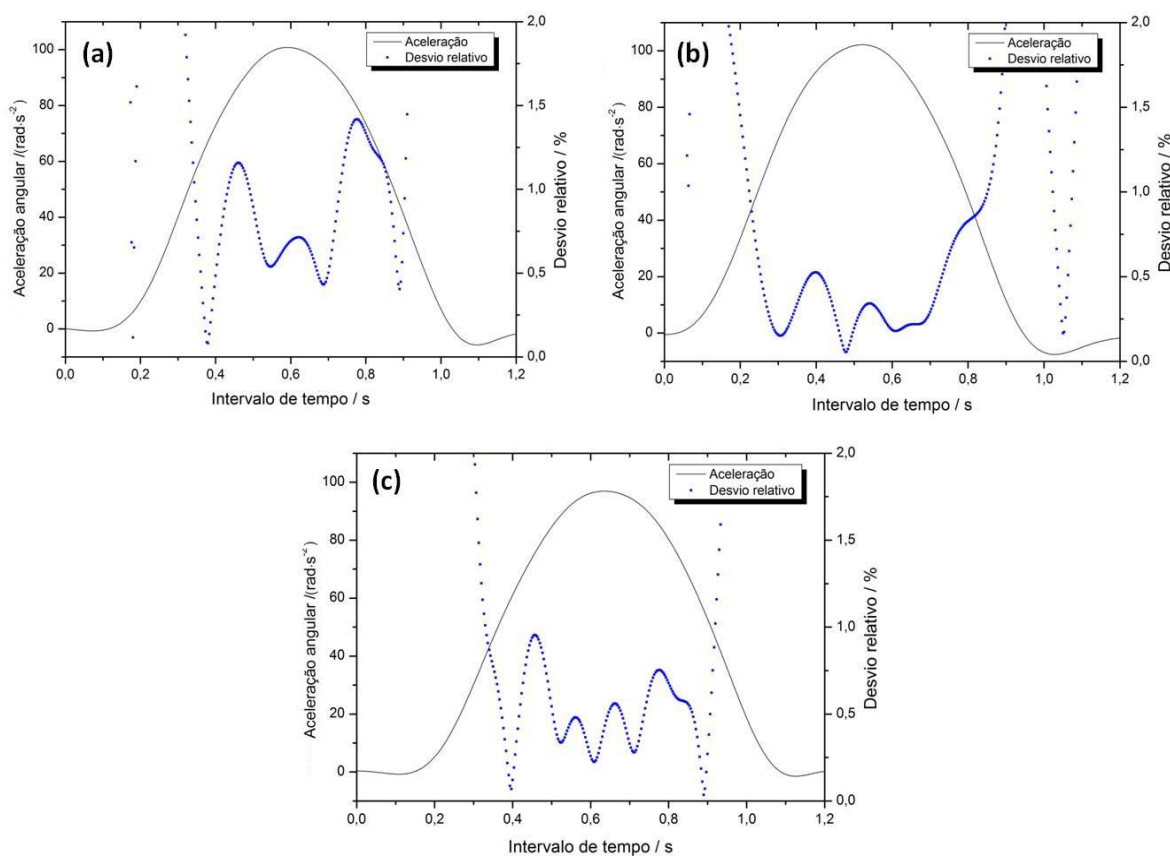


Figura 4.18 – Acionamentos com t_a de 3,0 s, intervalo de velocidade entre $104,72 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e $157,08 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e diferentes configurações de carga: (a) sem discos, somente o eixo; (b) disco D20; (c) disco D40.

Observa-se que as curvas apresentam comportamentos semelhantes, com os menores valores de desvio ($< 1\%$) tendendo para a região do pico e para as extremidades, apresentando valores mais altos.

Estes testes são bem reveladores para a boa aplicabilidade do método de acionamento pois agora tratam os carregamentos com as inércias acopladas, mantendo a qualidade das componentes aleatórias das curvas e do método de sincronização manual.

Cabe ratificar que a avaliação da repetibilidade para os dados medidos de torque não foi realizada devido aos torques de atrito encontrados.

4.2.3.2 Semelhança entre curvas de aceleração

A metodologia apresentada na Figura 3.8 define que as curvas de torque, medidos sob diferentes cargas, devem ser superpostas (sincronizadas) sobre a representação de uma mesma curva de aceleração, como mostra a Figura 3.10.b, pois dessa forma os acionamentos estariam referenciados a uma base comum e a comparação direta pode então ser realizada.

Porém, como os acionamentos devem incluir essas diferentes cargas inerciais, era razoável esperar que o sistema controlador apresentasse um pouco mais de dificuldade em acelerar o eixo conforme a inércia aumentasse, ou seja, a manutenção dos tempos de aceleração poderia não garantir os mesmo valores finais de aceleração, com pequenas alterações. Então, para cada disco de inércia foram realizados acionamentos com tempos de aceleração diferentes, variando em torno do valor alvo de 3,0 s com a resolução de 0,1 s permitida pelo controlador.

A Figura 4.19.a mostra, como exemplo desta metodologia, as curvas obtidas destes acionamentos para a configuração do eixo sem discos nos valores de t_a de 2,8 s, 2,9 s, 3,0 s, 3,1 s e 3,2 s. Os resultados dessa variação de valores de t_a promovem um efeito interessante do comportamento sistemático das curvas, que mantém a forma e altera suas características de pico e largura de base. Ao realizar essa metodologia de acionamentos com a variação de t_a nas demais configurações de inércia, deve-se buscar quais curvas de aceleração podem ser sincronizadas. A Figura 4.19.b mostra as curvas de aceleração tomadas das configurações "sem disco" e t_a de 3,0 s, "disco D20" com t_a de 3,0 s e "disco D40" com t_a de 2,9 s.

Observa-se que na Figura 4.19.b, com a utilização da curva D40 com t_a de 2,9 s e as demais curvas com t_a de 3,0 s, a sincronização das curvas é bem ajustada em toda a extensão, ficando apenas comprometida nas extremidades, principalmente após o descarregamento, que é quando o controle da curva de velocidade se ajusta ao valor alvo e portanto ocorrem as oscilações de controle.

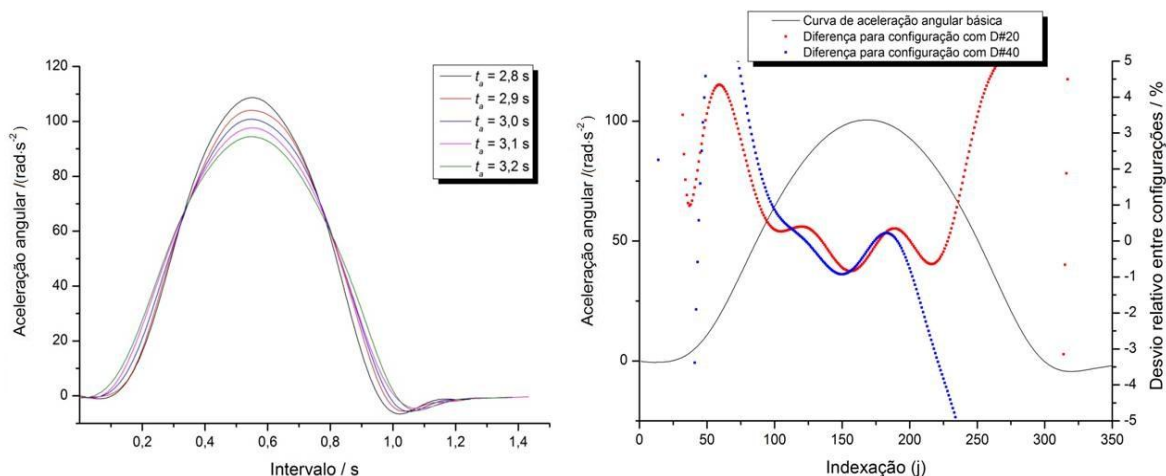


Figura 4.19 – Intervalo de velocidade entre $104,72 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e $157,08 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) acionamentos da configuração sem disco e com variação de t_a ; (b) sincronização entre as curvas de configurações de carga e t_a diferentes.

4.2.3.3 Verificação do princípio físico

Ainda na sequência de validação do princípio proposto, a curva de torque foi sincronizada com a curva de aceleração. A razão entre as duas grandezas determinou a curva de distribuição de valores θ_c do acionamento, como mostra a Figura 4.20. Segundo especificação técnica do sensor⁹¹, o momento de inércia do transdutor é $0,0023 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, o que corresponde à faixa de valores de θ_c encontrados no gráfico.

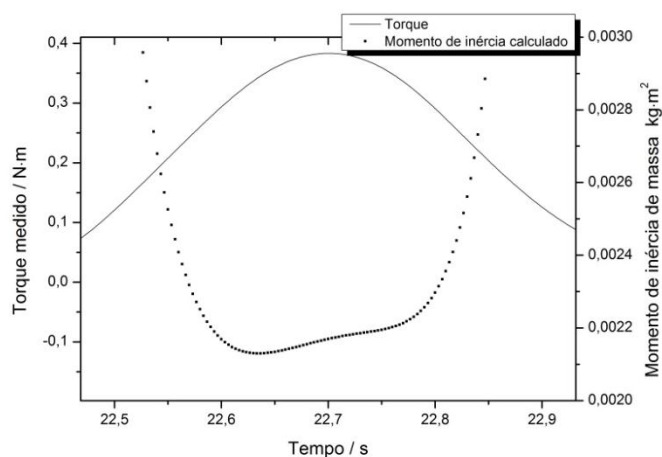


Figura 4.20 – Curvas de torque medido e momento de inércia calculado para o acionamento com o transdutor desacoplado do eixo de transmissão.

A realização destes testes, sempre que possível, é interessante pois atribui confiabilidade metrológica ao que está sendo medido antes de anexar os eixos e massas de inércia, passando a ser um valor de torque anterior ao T_{ti} utilizado na metodologia de obtenção dos dados comparáveis de torque.

4.2.3.4 Testes para a sequência de calibração

Embora o torque de atrito medido apresente um comportamento com certa sistemática, os dados de torque do transdutor obtidos experimentalmente não estão confiáveis o suficiente para uma análise detalhada, que atinja por exemplo uma resolução abaixo de 5% do torque nominal medido nas curvas. Dessa forma, os resultados devem ter sua interpretação mais voltada para avaliações de ordens de grandeza dos resultados, que embora não permita a observação dos detalhes, ofereça uma avaliação da metodologia de calibração ainda de maneira confiável.

A sequência da calibração define que os primeiros carregamentos devam ser realizados com a configuração inercial do eixo equivalente a θ_{i2} . Ainda segundo a metodologia de calibração proposta, esse valor de inércia, que é desconhecido e portanto sem validade como referencial, vai gerar um torque inercial e este por sua vez será correspondido por um torque medido no sensor, T_{ti} . A primeira configuração inercial deve ser aquela correspondente ao θ_{i2} (Figura 4.17.a) e os acionamentos devem ser realizados em seguida.

Reescrevendo as equações apresentadas no capítulo 3.2, a ordem para determinação dos valores líquidos de torque no determinado acionamento, está na Equação 23.

$$T_{tl(DXX)} = T_{t(DXX)} - T_{ti} \Leftrightarrow T_{ir(DXX)} \quad (23)$$

Ainda de acordo ao capítulo 4.1.3, nos valores originais de torque, um valor de T_{tz} deve ser determinado no patamar de velocidade constante no início de cada sequência de acionamentos de forma que sirva de valor de tara para os torques brutos T_{tb} medidos no acionamento e a diferença entre eles resulte o valor a ser trabalhado T_t . Porém, devido à questão do atrito muito alto encontrado nos acionamentos da bancada #2, esses valores de T_{tz} ficaram muito acima da condição de torque zero do transdutor, com isso, o valor de tara corrigido teve de ser muito alto, perdendo sua estabilidade.

Os seguintes valores de tara T_{tz} 0,882 N·m, 0,833 N·m, 0,641 N·m puderam ser definidos para as configurações de inércia "sem disco (SD)", "D20" e "D40" respectivamente. Mais uma vez cabe destacar que os valores foram encontrados a partir das médias de uma massa de dados contidos no período de 1 s, cujas

oscilações deverão ser consideradas somente no cálculo da incerteza de medição desse parâmetro no modelo final do mensurando.

A Figura 4.21.a mostra as curvas de torque medido T_t para as três configurações de inércia e, como referência do método, a altura correspondente aos valores líquidos de torque nos pontos de pico de torque. A Figura 4.21.b mostra as curvas de taxa de variação do torque $T_{\dot{t}}$ que alcança um valor nominal de aproximadamente $15 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ para o caso da configuração de inércia do disco D40 e um valor nominal máximo de $10 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ para o disco D20. Interessante destacar a simetria das curvas em relação ao eixo central, cortando a taxa zero, com os valores de taxa negativa e positiva atingindo o mesmo valor absoluto.

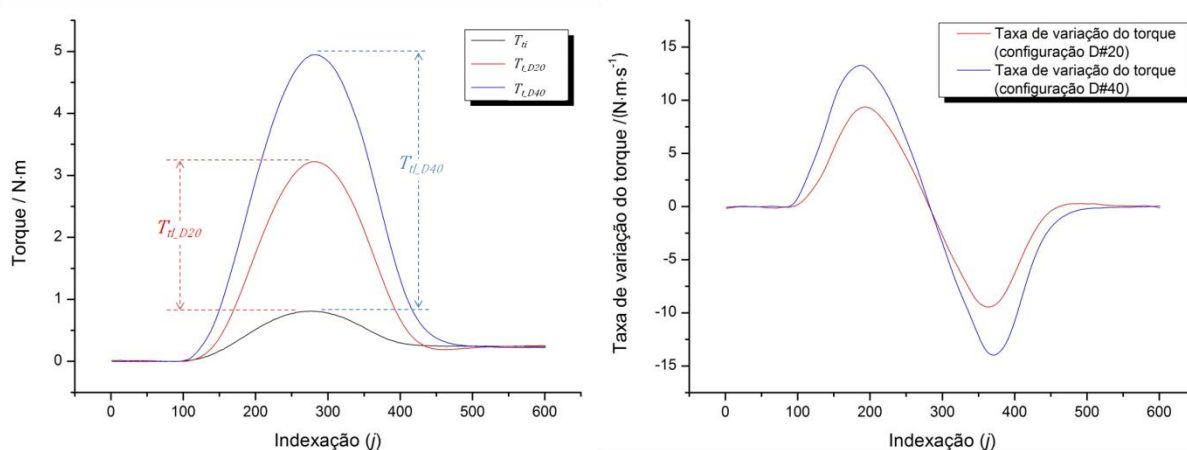


Figura 4.21 – (a) Curvas de torque medido T_{tra} , com as indicações dos torques líquidos e (b) taxas de torque calculadas dos valores de torque medidos.

Buscando fazer a comparação direta entre os valores de torque medido e os valores de torque de referência, a sincronização das curvas é importante. Para ratificar a diferença de forma entre os perfis das curvas de torque e aceleração, o gráfico da Figura 4.22 com as curvas de aceleração e torque normalizadas mostra ambos comportamentos diferenciados em cada grandeza. É notável o amortecimento nos dados de torque, com a banda mais larga e a ausência das oscilações. Não existe, como na bancada #1, um acompanhamento do sinal de torque medido pelo sinal de aceleração.

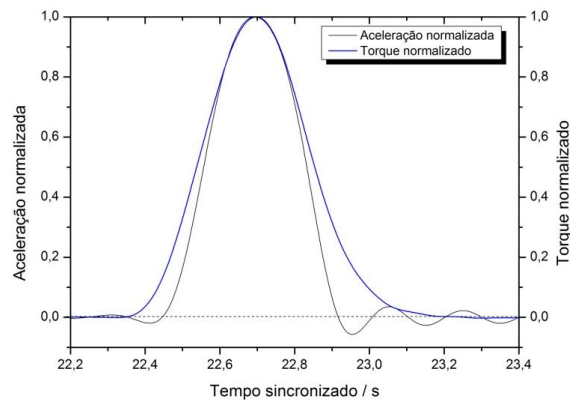


Figura 4.22 – Curvas sincronizadas normalizadas de torque medido e aceleração.

Embora com essa diferença entre os perfis das grandezas, é possível aplicar a metodologia da comparação direta entre valores de torque. Os gráficos da Figura 4.23 mostram os erros de medição calculados para o acionamento da configuração de eixo com $\theta_{r(D20)}$ e $\theta_{r(D40)}$. Embora o estudo minucioso dessas curvas tenha sido prejudicado pelo atrito nos mancais e pela diferença muito acentuada entre os perfis, é possível observar a dependência temporal tendenciosa nos dados de $E(j)$, como foi visto nos testes da bancada #1. O mapeamento deste tipo de comportamento dos sensores é o objetivo principal do método de calibração e mais uma vez ficou comprovada a boa aplicabilidade com esse fim. Como existe o cruzamento entre as curvas de torque, nesses pontos de inflexão o valor de $E(j)$ sofre uma disparada.

Sobre as diferenças entre as curvas, observa-se que o acionamento com $\theta_{r(D20)}$ a tendência do erro de medição tem uma maior inclinação, enquanto que na configuração com $\theta_{r(D40)}$ a curva de $E(j)$ aparece mais horizontal. No entanto, interessante observar que, no ponto referente ao pico de torque das curvas, aproximadamente 2,5 N·m e 5 N·m respectivamente, o valor de $E(j)$ está em torno de -7% para ambas configurações. Esse é mais um interessante indicativo resultante do método, onde para valores de torque próximos, à taxa de variação nula, os erros tendem a se assemelhar, enquanto que, a medida que existe a taxa de variação, o comportamento pode se alterar mesmo que ainda siga uma tendência.

Já para a comparação indireta, a proposta é concatenar todos os dados de torque medido bruto T_{tb} e a aceleração α , em ambas as condições de inércia com disco e sem o disco, numa análise gráfica dos acionamentos. A partir da relação linear entre as grandezas, premissa do princípio físico adotado, uma reta de ajuste pode ser determinada para os dados.

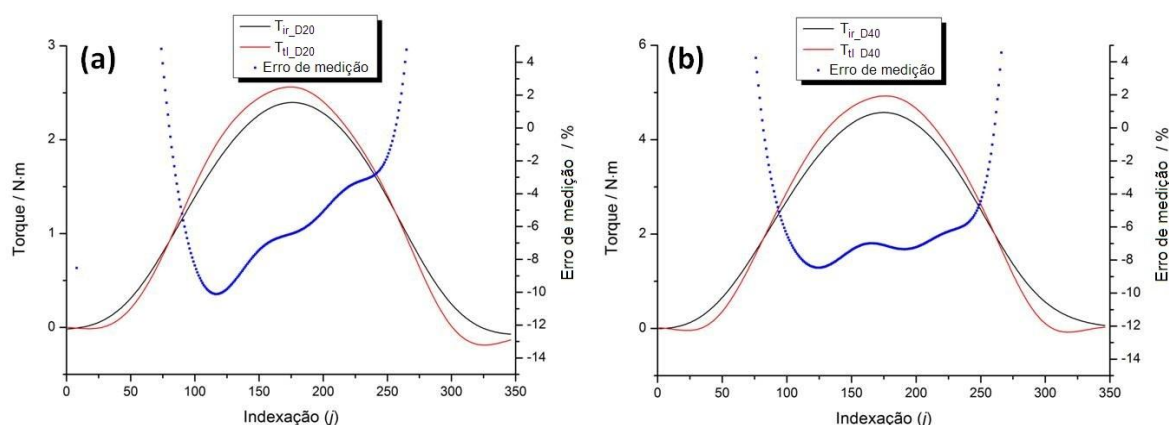


Figura 4.23 –Curvas de torque medido, torque de referência e erro de medição para: (a) disco de inércia D20 e (b) disco de inércia D40.

Nesta análise, mais aprofundada que aquela realizada na bancada #1, deve-se definir qual porção da massa de dados será utilizada para o cálculo da curva de ajuste. A definição dos pontos de corte que definirão a porção de dados representativa seguirá parâmetros de estabilidade com respeito ao princípio. Por exemplo, já se sabe que as extremidades da curva apresentam maiores dispersões e os erros de medição são menos estáveis e portanto não é produtora utilizar essa região para análise.

A Figura 4.24 mostra o cruzamento de toda a massa de dados de aceleração e torque obtidas dos acionamentos da bancada #2 e, em vermelho, a porção selecionada para o cálculo da curva de ajuste. Interessante observar a tendência ou inclinação dos dados. Já nas regiões próximas à aceleração zero e com aceleração negativa, os dados estão mais confusos, sem uma tendência aparente, o que passa a ser mais um motivo para que se realize a seleção de uma porção de dados mais confiáveis para levantamento dos dados da curva.

A Figura 4.25 mostra as curvas estendidas α versus T_{aju} em cada configuração de inércia, já desconsiderando o coeficiente "b" de intercepção da reta no eixo do torque.

Os coeficientes angulares a_{SD} , a_{D20} e a_{D40} representam os coeficientes angulares para as equações das curvas de ajustes utilizando como dados de origem as partes selecionadas de α_{ref} versus T_{tra_bru} . Ao se diminuir a_{SD} de a_{D20} , obtém-se o coeficiente $\theta_{s(D20)}$ que poderá ser comparada ao momento de inércia de $\theta_{r(D20)}$, como resume a Equação 24 para o caso genérico $\theta_{s(DXX)}$. O mesmo deve ser realizado para o disco D40 e obter $\theta_{s(D40)}$.

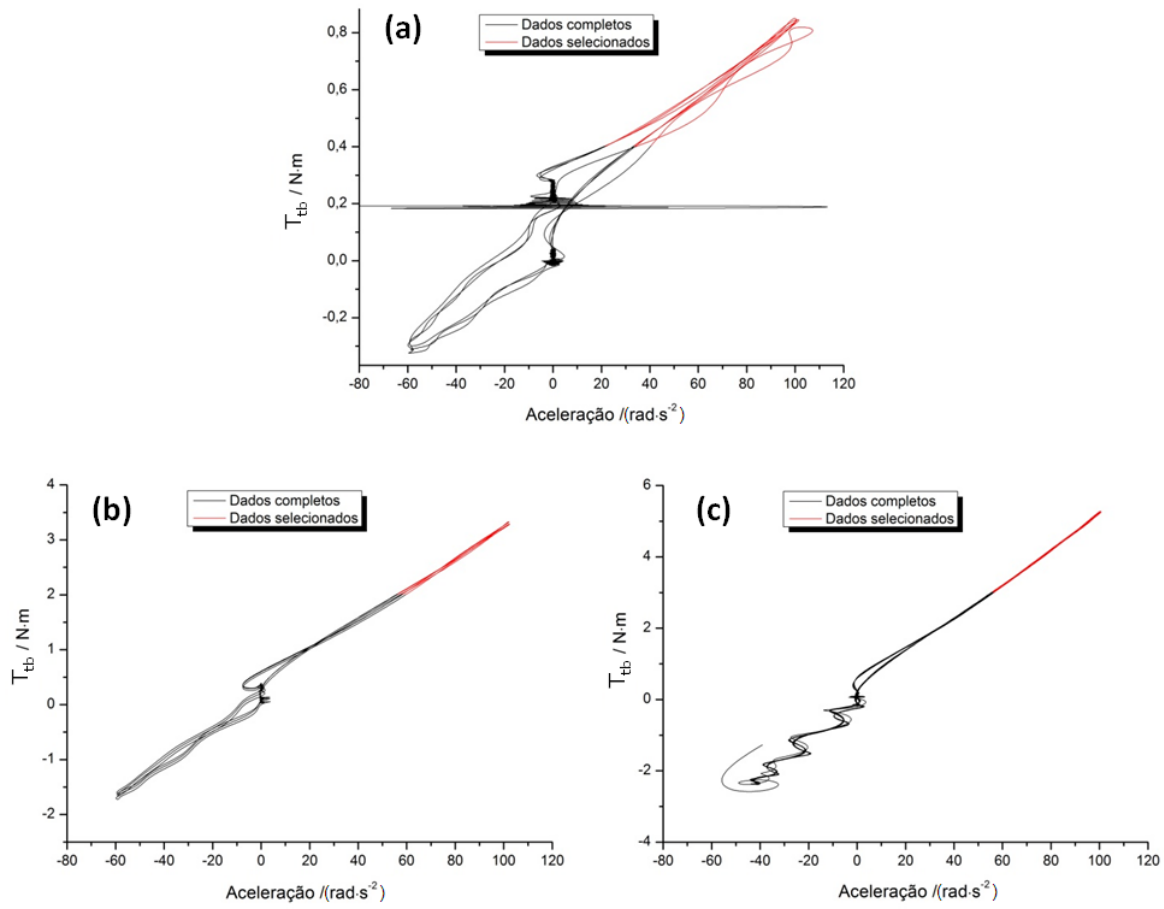


Figura 4.24 – Curvas de aceleração versus torque para (a) configuração de inércia sem disco; (b) com disco D20 e (c) com disco D40.

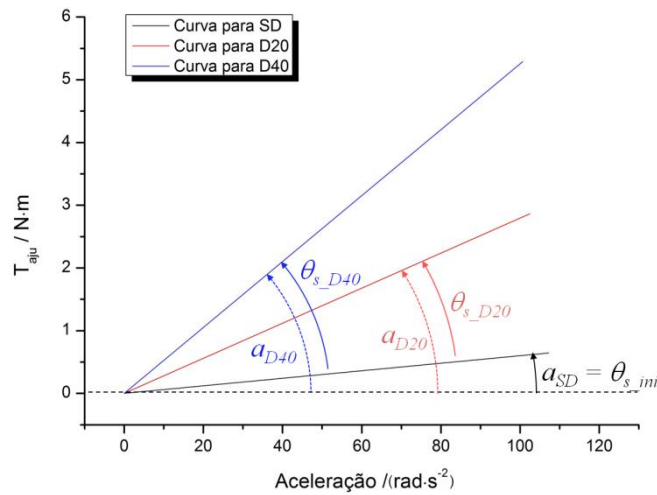


Figura 4.25 – Curvas lineares ajustadas de aceleração versus torque para as configurações indicadas.

$$\theta_{s(DXX)} = a_{DXX} - a_{SD} \quad (24)$$

Nos exemplos dos acionamentos da bancada #2, foi interessante definir diferentes pontos de corte em cada configuração de inércia e então determinar o erro (E_θ) entre os valores de θ_s e θ_r . Devido ao atrito detectado nos mancais e a diferença entre os perfis de torque e aceleração, o que cria uma expectativa de não linearidade dos dados, diferentemente daquilo que aconteceu nos dados avaliados da bancada #1.

A Tabela 4.14 apresenta uma comparação entre os valores de $\theta_{s(DXX)}$ e θ_r , sendo que este último se refere aos valores de momento de inércia de massa calculados pelo software CAD, utilizado no projeto dos discos de inércia.

Tabela 4.14 - Valores calculados de θ_s em comparação aos valores de referência θ_{ref} .

Configuração inercial	Ponto de corte em SD / N·m	Ponto de corte em DXX / N·m	$\theta_{s(DXX)}$ / kg·m ²	θ_r / kg·m ²	Erro relativo
<i>Disco D20</i>	0,4	2,0	0,02355	0,02489	5,4%
		1,5	0,02275		8,6%
<i>Disco D40</i>	0,4	4,0	0,04650	0,04957	6,2%
		3,5	0,04571		7,8%

Os resultados desta tabela mostram uma sensibilidade do método à seleção dos pontos de corte e aos diferentes desvios de linearidade dos dados. Para uma avaliação mais aprofundada desse comportamento, foram levantados os desvios de linearidade de cada ponto dos acionamentos, com pontos de corte 0,4 N·m, 2 N·m e 4 N·m para as configurações de inércia SD, com o disco D20 e com o disco D40, respectivamente.

A Figura 4.26 mostra os desvios de linearidade, calculados para as duas condições de inércia, de torque medido T_{tb} em relação a T_{aju} , da curva de ajuste. Em relação à Figura 4.13, que retratava os desvios de linearidade relativos para os dados obtidos dos acionamentos na bancada #1, os desvios de linearidade da bancada #2 tem valores mais altos e de maior dificuldade para identificar os caminhos percorridos pelos desvios de linearidade, o que retrata ou caracteriza os comportamentos de histerese naquela faixa de torque, embora sejam diferentes para os acionamentos de uma mesma configuração de inércia.

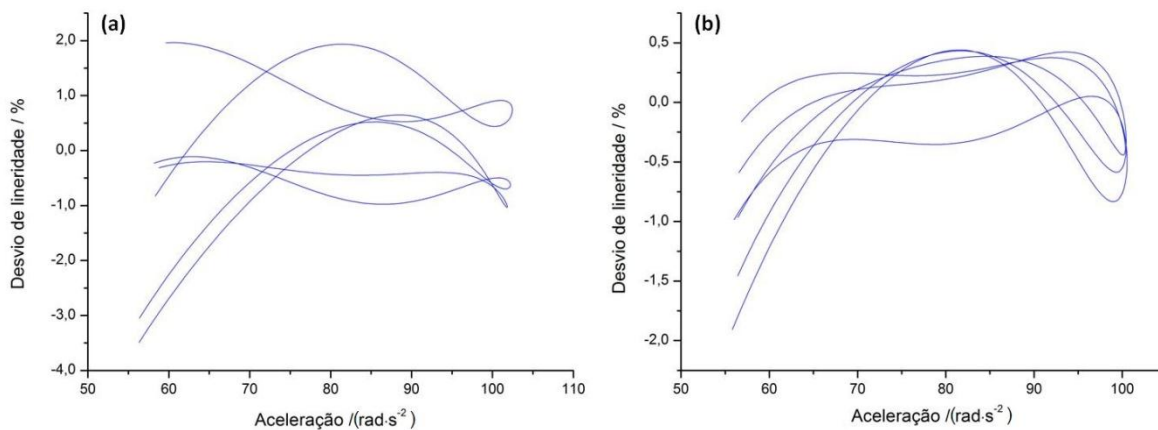


Figura 4.26 – Desvios de linearidade para as curvas ajustadas em (a) D20 e (b) D40.

Com esses resultados gráficos, observa-se que a avaliação de linearidade pontual, em um conjunto de dados que apresente essa ordem de grandeza nos desvios, não constitui a mais simples forma de avaliação do conjunto total de dados, o que vai contra o objetivo do método proposto em apresentar uma alternativa à comparação direta. Os derivados desta avaliação proposta com melhor representatividade de todas as curvas, além de apresentarem o valor do coeficiente angular calculado e da sua comparação com o momento de inércia de massa do disco utilizado, podem apresentar também, como parâmetro de análise dos desvios de linearidade, a incerteza dos dados em relação à curva linear de ajuste calculada, conforme método e procedimento que serão mostrados no capítulo 4.4.2.

Pelos resultados das duas configurações inerciais, D20 e D40, restringindo a avaliação à ordem de grandeza dos valores estimados, conclui-se que a ponderação dos dados pelo ajuste linear é viável embora não retrate os mesmos resultados obtidos da comparação direta utilizando $E(j)$.

4.2.4 Considerações sobre os resultados parciais

A bancada #2 consistiu de uma montagem parcialmente diferente, com outro motor e outro sistema DAQ. O bom comportamento de estabilidade e a simplicidade dos acionamentos observados na bancada #1 pôde ser ressaltada também na bancada #2.

As leituras de torque e aceleração precisaram ser ajustadas pois apresentaram uma defasagem temporal, causada pelo próprio sistema DAQ usado. Com a sincronização manual, o princípio físico pôde mais uma ser comprovado.

Os acoplamentos hidráulicos, os acoplamentos flexíveis, os desenhos dos discos inerciais, a disposição dos componentes no eixo e os discos de inércia mostraram ser de fácil manipulação e de montagem confiável.

O capítulo apresenta formas de testes complementares para a detecção de vibrações do eixo e atritos nos mancais. As influências desses fenômenos podem ser tomadas como restrições às faixas de velocidade dos acionamentos ou como carga parasita a ser descontada nos valores de torque inicial.

Os acionamentos com os discos alcançaram uma taxa de $15 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, dentro da previsão para a bancada e o principal objetivo da bancada #2 no entanto foi testar as metodologias de calibração e sequências de operação para os dois métodos de comparação propostos. O método de conjugação dos vários valores de torque para a obtenção dos torques líquidos para comparação direta com os torques de referência pôde ser verificado. Os resultados de $E(j)$ mostraram, como na bancada #1, uma dependência temporal.

O método de comparação indireta apresentou resultados interessantes pois puderam ser melhor explorados que na bancada #1. A relação entre os coeficientes de inclinação obtidos de curvas de ajuste de determinadas faixas selecionadas das massas de dados e os momentos de inércia de massa de referência define o erro de medição desse coeficiente calculado (E_θ).

4.3 Considerações sobre o processamento de dados

Como visto até este ponto da tese, o tratamento aplicado aos dados tanto na aquisição quanto no processamento *off-line* tem influência direta nos resultados das medições. Os processos de tratamento de dados adotados até agora nos estudos das medições obtidas dos acionamentos não cumpriram um papel protagonista pois o foco maior era a ordem de grandeza dos comportamentos das curvas.

Porém, como já foi observado nos resultados experimentais, ao medir grandezas mecânicas variantes no tempo, o erro dinâmico é introduzido, ou seja, a proporcionalidade entre o estímulo e a resposta pode não se manter como nas medições estáticas, o que deve ser determinado pela calibração dinâmica proposta. No entanto, a fim de atenuar esses erros, o sinal medido é pós-processado e a

modelagem dinâmica do sistema pode ser introduzida^{92; 93}. Com isso, a escolha de um método ou parâmetro para o processamento de sinais é uma etapa importante no processo conforme o objetivo do operador e, para uma boa caracterização do sistema de medição, esta deve abranger um estudo sobre as influências desses parâmetros.

O estudo aqui apresentado é aplicado às ferramentas que demonstram ter maior influência direta nos resultados medidos dos acionamentos de características já demonstradas na tese, com o objetivo de chamar a atenção para a necessidade de se considerar os termos abaixo, durante a calibração e a caracterização dos sistemas:

- taxa de aquisição adequada;
- filtro digital adequado;
- cálculo da aceleração - método de derivação dos dados de velocidade.

4.3.1 Taxa de aquisição

A seleção da taxa de aquisição, ou taxa de amostragem, a ser utilizada num processo de medição é sem dúvida o primeiro passo a ser tomado. Na representação de um fenômeno em medição, a redução na taxa de amostragem equivale à aplicação de um filtro passa-baixa, ou seja, menores taxas de aquisição podem significar uma redução na magnitude e frequência dos sinais.

Basicamente, pode-se instituir que quanto maior a taxa de aquisição, menor o intervalo de tempo entre dados e maior a fidelidade à reprodução do sinal analógico ou, no caso, do mensurando. O Teorema de Nyquist institui que uma taxa de amostragem mínima deve ser duas vezes o valor da frequência do sinal analógico para manter essa fidelidade. Teoricamente, se a taxa de amostragem é menor que a frequência de Nyquist, ocorre o efeito de *aliasing*, onde sinais de alta frequência acabam sendo mal reproduzidos, resultando em sinais de frequência menor⁹⁴.

Como foi demonstrado nos resultados dos acionamentos Ac#1 e Ac#4 da sequência de testes da bancada #1, a alteração da taxa de aquisição pode ocasionar em representações diferenciadas de um mesmo fenômeno.

Para um estudo mais aprofundado sobre a influência das taxas de aquisição, no contexto dos regimes de medição propostos no sistema de calibração, foram

utilizadas simulações computacionais baseadas nos dados das curvas reais de acionamento obtidas daqueles acionamentos da bancada #1. Para tal foi utilizado o software CAD SolidWorks com a ferramenta de análise de movimento. A partir do eixo projetado em CAD, que representa o eixo de transmissão e o disco de inércia de referência (Figura 4.27.a), essa ferramenta permite entrar com os dados reais da curva de velocidade e o software calcula os dados de aceleração correspondentes (Figura 4.27.b). A extremidade do eixo oposta ao disco seria correspondente à face disponível para acoplamento do transdutor em calibração e medição do torque.

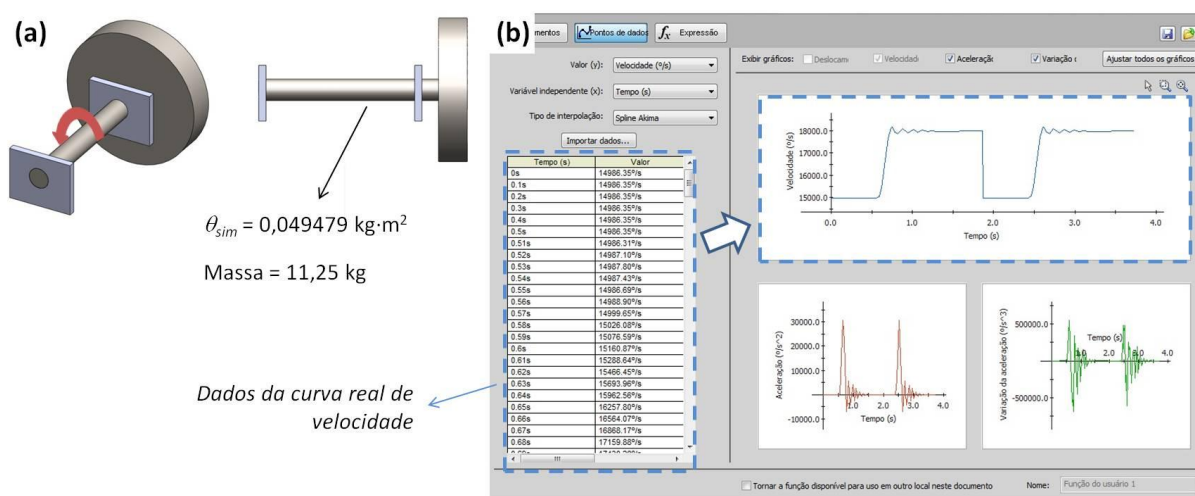


Figura 4.27 – (a) Eixo projetado em CAD e (b) tela de ajuste das características de acionamento do software de simulação.

A ferramenta de análise de movimento permite obter dados de torque inercial obtidos da simulação, quando no projeto CAD já foram calculados os valores de massa e momento de inércia de massa do eixo (θ_{sim}), respectivamente 11,25 kg e $0,04948 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Isso equivale aproximadamente às características do eixo real com o disco inercial D40 acoplado. O perfil de aceleração utilizado foi aquele obtido do perfil médio do acionamento Ac#2, que alcançou os maiores valores de aceleração, sendo que este foi reproduzido nos valores de velocidade para dois intervalos distintos, sendo o degrau #1 de $52,1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ até $104,3 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e o segundo intervalo de velocidade, o degrau #2, entre $261,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e $313,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, ou seja, dois perfis de aceleração idênticos aplicados a dois intervalos de velocidade distintos.

Ao processar a simulação, é possível definir a resolução de tempo da mesma através de diferentes números de ciclos por segundo, o que para a pesquisa simula as taxas de aquisição aplicadas. Para este estudo foram utilizadas então as taxas de 300 Hz, 100 Hz e 50 Hz. O perfil de aceleração do Ac#2 foi reproduzido duas vezes

para cada intervalo de velocidade, simulando dois carregamentos com o preenchimento dos patamares com valores constantes de velocidade equivalentes aos extremos dos intervalos. A Figura 4.28 mostra como ficaram as rampas de aceleração no perfil de velocidade, com o intervalo de velocidade entre v_{ini} e v_{fin} , e as respostas em torque nas duas rampas de carregamento distribuídas ao longo do tempo da simulação.

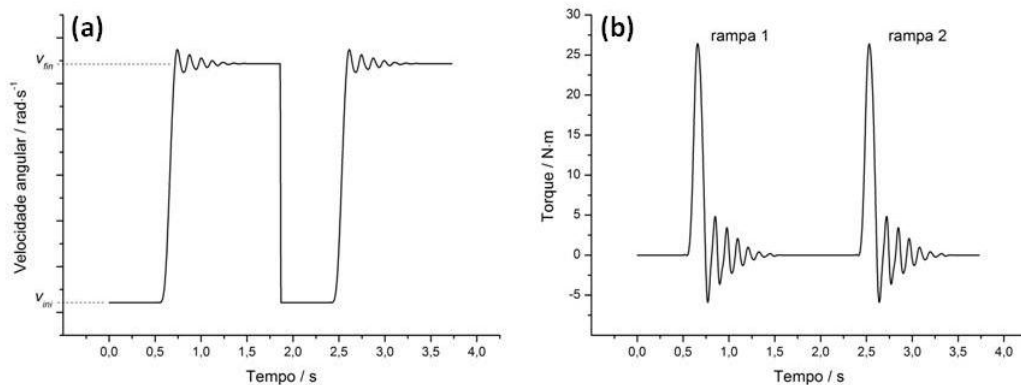


Figura 4.28 – (a) Rampas de aceleração no perfil de velocidade e (b) respostas em torque distribuídas ao longo do tempo da simulação.

A fim de gerar uma perturbação ao acionamento, no projeto CAD foram desenhadas duas configurações de eixo. A primeira com o disco concêntrico em relação ao eixo de transmissão e a segunda com um leve desvio entre centros de 0,04 mm. Esse valor de excentricidade é um dos resultados obtidos da calibração do disco D40, que foi realizada no Laboratório de Metrologia Dimensional do Inmetro e está melhor detalhado no capítulo 4.4.1.6 referente à incerteza de medição.

Na aplicação real, a excentricidade entre as partes gera o deslocamento do centro de massa do disco na mesma quantidade e consequentemente da força peso daquela parte, o que irá gerar uma componente de torque com perfil periódico e senoidal, pois conforme o eixo gira, o centro de massa se posicionará em diferentes coordenadas em relação ao eixo de transmissão.

Na simulação, o mesmo efeito poderá ser observado, uma vez que é possível implementar no software a função gravitacional, onde o valor de aceleração da gravidade de $9,80665 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ foi utilizado. A massa isolada do disco em CAD é 9,865 kg e a componente de torque senoidal resultante terá valor modular máximo de 0,00387 N·m e sua influência na leitura deve ser observada pois irá se somar à componente inercial gerada pela aceleração de todo eixo.

A Figura 4.29 mostra resultados interessantes para a comparação entre os resultados obtidos nas simulações do degrau#1 de velocidade com o disco centralizado e o disco descentralizado. A Figura 4.29.a mostra a diferença entre os valores de torque obtidos na rampa 1 e a Figura 4.29.b mostra esta diferença para a rampa 2 na taxa de amostragem de 300 Hz. Os demais pares de letras mostram essas diferenças para as outras taxas, sendo (c) e (d) para 100 Hz e (e) e (f) para 50 Hz.

Observa-se que nos gráficos referentes à taxa de 300 Hz, mesmo as rampas sendo idênticas, a rampa 2 mostra uma amplitude muito maior para os desvios que a rampa 1. Isso ocorre pois os momentos de realização das rampas não estão sincronizados em relação aos intervalos de tempo referentes ao torque senoidal. Por exemplo, a Tabela 4.15 mostra os picos de torque obtidos da simulação para as rampas 1 e 2 em cada configuração de centralização do eixo em relação ao eixo.

Tabela 4.15 - Picos de torque calculados para as configurações de centralização do disco de inércia em relação ao eixo. Taxa de amostragem de 300 Hz.

<i>Configuração</i>	<i>Pico rampa 1 / N·m</i>	<i>Pico rampa 2 / N·m</i>
Centralizado	26,529	26,529
Descentralizado	26,526	26,551

Já ambos os gráficos referentes à taxa de amostragem de 100 Hz mostram dispersões variadas ao longo da curva para as situações de centralização e descentralização do disco. Para os gráficos referentes à taxa de 50 Hz, o comportamento se assemelha aos de 300 Hz, ou seja, existe uma piora nos desvios na rampa 2. Ainda assim, como pôde ser observado na avaliação do acionamento Ac#3, a taxa de 50 Hz representa ou reconstitui a curva de torque sem uma boa definição.

Para avaliar a diferença no comportamento dos dados na curva de acionamento com a mudança de degrau, pode-se realizar uma comparação qualitativa dos gráficos gerados em cada taxa de aquisição. A Figura 4.30 mostra os três gráficos representando as três taxas, sendo que em cada um estão ambas as curvas da rampa 1 para os degraus #1 e #2.

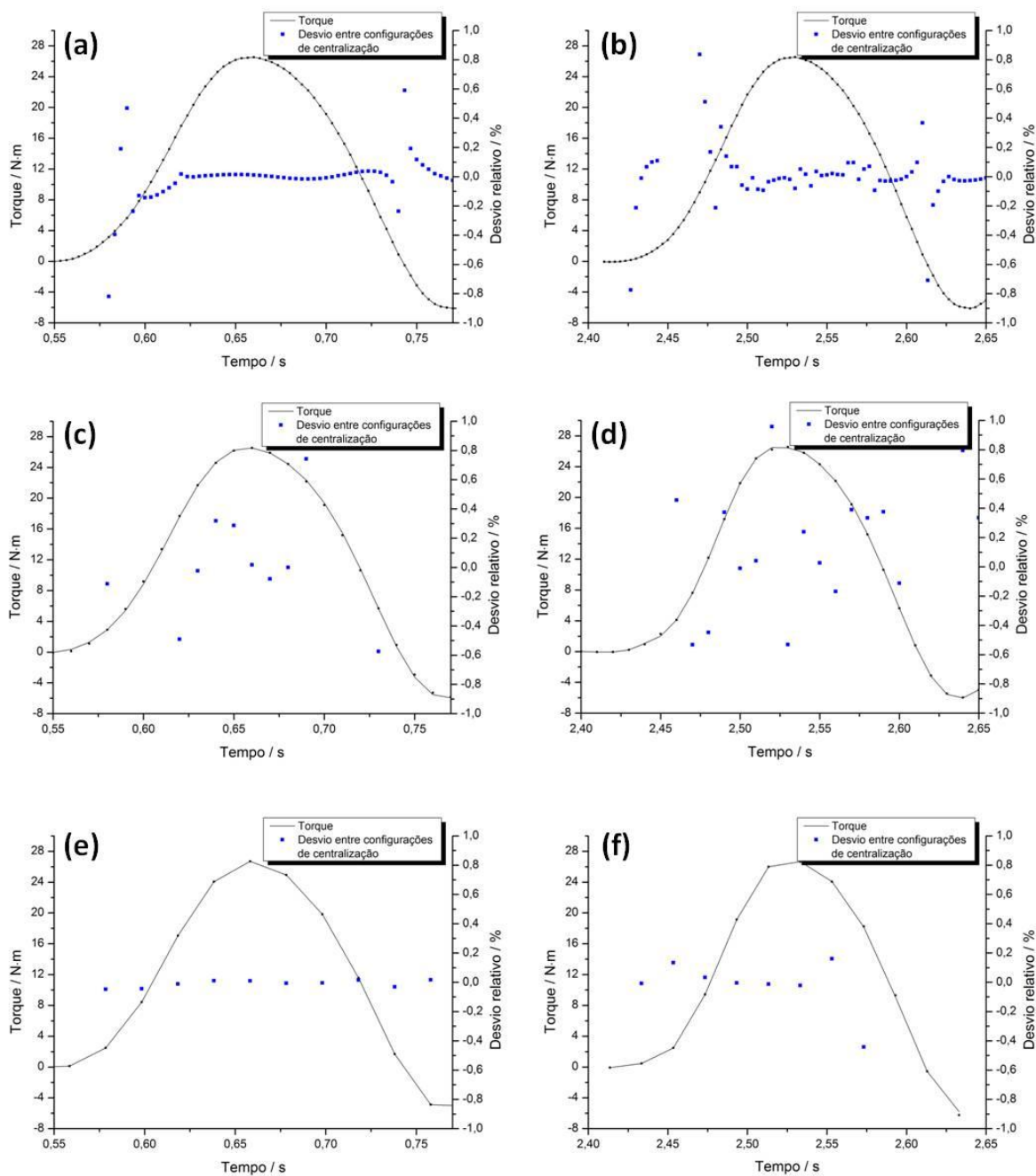
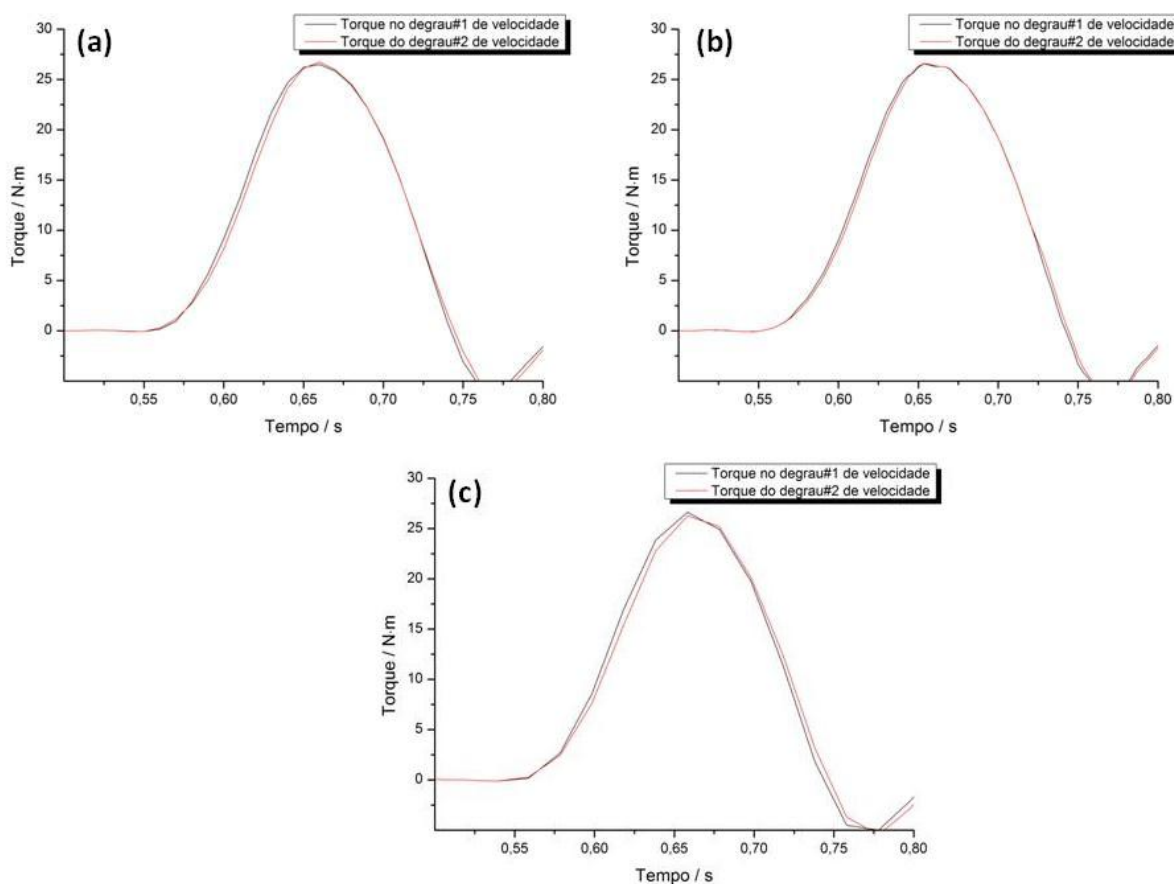


Figura 4.29 – Comparações entre as rampas 1 e 2 das simulações no degrau#1 para as situações de centralização do disco: (a, c, e) Rampa 1 e (b, d, f) Rampa 2.

É possível observar um leve atraso nos dados obtidos do degrau #2 em relação ao degrau #1, sendo que este atraso aparece mais claramente nos gráficos relativos à taxa de 50 Hz. Os resultados da rampa 2 apresentaram os mesmos comportamentos e não foram reproduzidas aqui.



**Figura 4.30 – Rampa 1 para os degraus #1 e #2 nas taxas de aquisição:
(a) 300 Hz, (b) 100 Hz, (c) 50 Hz.**

Além da avaliação da influência da seleção da taxa de aquisição no período do acionamento com a presença de aceleração angular, outro regime importante que pode ser avaliado está nos patamares de velocidade constante que ocorrem antes e depois do acionamento com aceleração. Nesses patamares deve ser possível verificar mais claramente os valores de torque senoidal e portanto a influência da taxa de amostragem é avaliada.

A Figura 4.31 mostra as ondas periódicas de torque, geradas pela excentricidade na montagem do disco, nos patamares de velocidade constante em: (a) v_{ini} do degrau #1; (b) v_{fin} do degrau #1; (c) v_{ini} do degrau #2; (d) v_{fin} do degrau #2. A Figura 4.31.a apresenta claramente a amplitude do valor de torque, atingindo valores de pico e vale de 0,00386 N·m, como foi calculado anteriormente. Neste gráfico todas as taxas de aquisição conseguiram reproduzir igualmente a curva de torque.

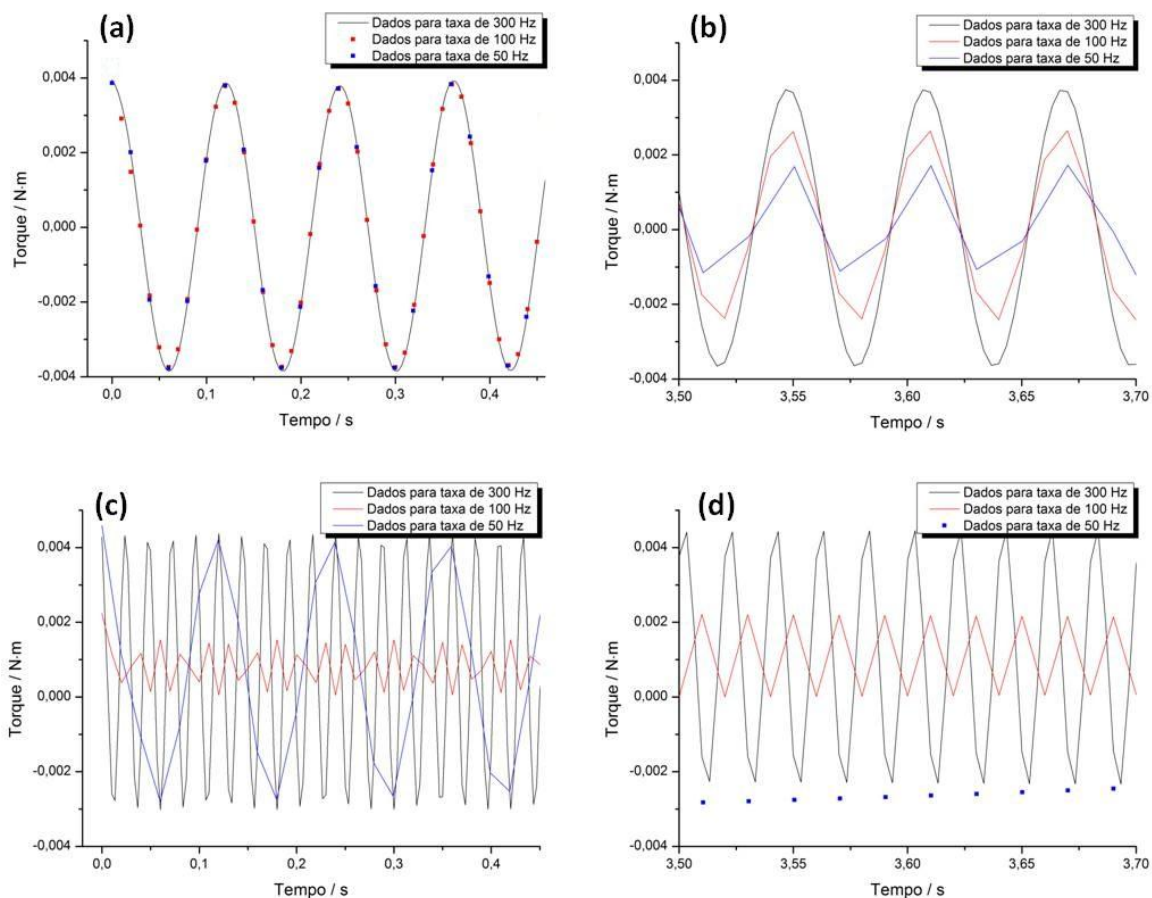


Figura 4.31 – Patamares de velocidade: (a) v_{ini} do degrau #1; (b) v_{fin} do degrau #1; (c) v_{ini} do degrau #2; (d) v_{fin} do degrau #2.

A Figura 4.31.b mostra o sinal de torque reproduzido com a manutenção de sua frequência mas com a perda de amplitude para as taxas de 100 Hz e 50 Hz.

No gráfico da Figura 4.31.c por exemplo, o valor do patamar de velocidade angular v_{ini} do degrau #2 representado é $261,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (41,7 Hz). As taxas de 300 Hz e 100 Hz conseguem reproduzir essa frequência, enquanto a taxa de 50 Hz reproduz um sinal de $57,2 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (9,1 Hz), incoerente com a realidade.

No gráfico da Figura 4.31.d, o valor do patamar de velocidade angular v_{fin} do degrau #2 representado é $313,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (49,9 Hz). Os dados originados da taxa de 300 Hz tem uma frequência de oscilação de $314,2 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (50 Hz), enquanto que a taxa de 100 Hz reproduz um sinal de $297,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (47,4 Hz). Já a taxa de 50 Hz não conseguiu reproduzir o sinal de forma oscilatória.

Sabendo que sistemas ideais não existem na realidade, ou seja, são aqueles onde o regime a ser medido é o único presente no fenômeno real e não existem componentes parasitas como o torque devido à periodicidade da força peso

excêntrica, o quadro de simulação da descentralização mostra de maneira bem clara como um simples parâmetro, mesmo que respeitando o princípio teórico de Nyquist, pode gerar dúvidas nos parâmetros medidos (Figura 4.31.b).

Pode-se concluir que a quantificação ou condensação das influências da variação da taxa de aquisição a priori de um processo de medição não foi plausível mesmo conhecendo o fenômeno a ser medido. Desta forma, a única maneira de garantir confiabilidade metrológica ao processo é tentar mapear de forma sistemática essas componentes extras que possam surgir.

Para os períodos em que ocorre a rampa de aceleração e conseqüentemente de torque, a variação nas taxas de amostragem não mostrou exercer muita interferência no perfil obtido das curvas. No entanto, a influência que ocorre poderá ser minimizada com a aplicação de um bom número de rampas. O número inicialmente sugerido na apresentação da metodologia de calibração dinâmica de 3 carregamentos não seria suficiente para a caracterização média dos perfis. Essas várias rampas aplicadas em sequência servem para diluir os problemas de *aliasing* que possam estar acontecendo, além de outras componentes parasitas do torque como o próprio atrito.

Realizar medições com patamares constante em valores nominais intermediários de velocidade, ou seja, não muito altos e nem muito baixos, antecedendo os acionamentos com ajustes de aceleração do inversor, constitui uma prática interessante pois o torque oscilatório poderá ser medido com boa confiabilidade metrológica, fazendo de certa forma uma verificação da montagem e podendo ser avaliado dentro da metodologia de calibração, devendo-se respeitar as restrições impostas aos dados pelas ferramentas de filtragem aplicadas na sequência do processamento que serão detalhadas no capítulo a seguir.

A metodologia de calibração se utiliza da manipulação dos dados de torque, velocidade e aceleração através da intervenção direta do operador. Uma taxa de amostragem muito alta, embora vá cobrir mais confortavelmente os problemas de reconstrução dos sinais em qualquer patamar de velocidade, também vai gerar uma massa muito grande de dados, exigindo um esforço computacional e por que não dizer humano no seu processamento. O equilíbrio entre as necessidades de reconstrução de sinal de determinado regime aplicado e a suficiência na amostragem e manipulação dos dados pode ser determinado com estudos práticos prévios à calibração em si. Esses testes podem constituir um item de preparação no

procedimento que descreverá os passos da calibração dinâmica de transdutores de torque.

4.3.2 Estudos da aplicação de filtros

Após a seleção da taxa de amostragem, a aplicação de filtros digitais constitui o segundo mais importante parâmetro no processamento dos dados. A atenuação dos sinais se torna mais simples quando o sinal primário (velocidade) e os sinais de ruídos estão separados no domínio da frequência. O filtro no domínio da frequência mais comumente utilizado é o tipo *Fast Fourier Transform*, ou mais conhecidos como filtros FFT. Para a aplicação e regime propostos, o tipo de filtro utilizado é o denominado passa-baixa, ou seja, o filtro que, atuando no domínio da frequência, permite a passagem de sinais com frequências mais baixas que a frequência de corte ajustada no filtro⁹⁴.

Para a aplicação, o filtro pode estar atuando no momento da medição, modo *online*, ou após a conclusão dessa, ou seja, modo *off-line*. De uma forma geral, a opção por qual método de filtragem utilizar dependerá da aplicação do sensor. Por exemplo, se há a necessidade de usar os dados de torque logo no momento de sua medição, o método de filtro *online* deve ser aplicado enquanto que, se a aplicação do sensor faz parte de um estudo ou pesquisa que não necessita de uma realimentação dos dados, essa filtragem pode ser feita num segundo momento, no método *off-line*.

A Figura 4.32 mostra as duas situações para acionamentos com mesmas características, sendo um com os dados de torque obtidos sem o filtro *online* e o outro com um filtro *online* aplicado de 50 Hz. Posterior à medição, ambas as curvas são sincronizadas manualmente e um filtro *off-line* de 5 Hz é utilizado, ou seja, um filtro com forte redução de sinais. Observa-se que, mesmo utilizando este filtro *off-line* de mesma característica, a curva originalmente sem filtro ainda manteve ruídos. Essa diferença prática entre as condições de filtragem deve ser avaliada e tomada em conta.

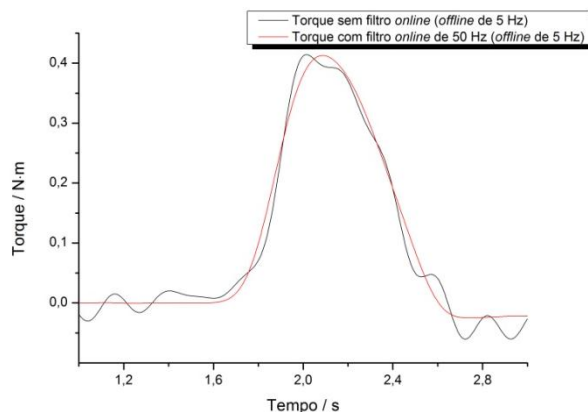


Figura 4.32 – Dados de torque obtidos de dois acionamentos com filtro *online* de 50 Hz e sem filtro *online*. Ambos filtrados *off-line* em 5 Hz.

Para a calibração do conjunto sensor e indicador digital, o ideal é a realização da filtragem de acordo à aplicação do cliente, embora uma primeira indicação, ou orientação, seja a opção pela filtragem *online*, seja ela por hardware ou software, pois assim se restringe o escopo da calibração a uma condição real de uso dos instrumentos, seguindo informações prévias enviadas pelo usuário. Na calibração, deve-se observar que esses filtros são aplicados em todo o período de medição e portanto eliminam de forma igual, em todos os pontos do acionamento, seja no patamar de velocidade constante ou nas rampas de aceleração, aquelas componentes com frequências acima daquela estipulada para o corte. Essa observação é importante pois a massa de dados após a filtragem passa a ser a massa de dados válida para a calibração, ou seja, não há mais referências aos dados originais mensurados sem os filtros.

Assim, aquele procedimento destacado no Capítulo 4.2.3 para a avaliação dos patamares de velocidade constante, principalmente aqueles que antecipam os carregamentos com aceleração, pode ser realizado sob filtros com frequências de corte mais altas que os filtros aplicados na calibração e que comportem as velocidades encontradas nos patamares.

Para os estudos desta tese, uma junção dos dois métodos foi utilizada, sendo o método *online* utilizado com uma frequência de corte alta e o método *off-line* para possibilitar o estudo da diversificação das características dos filtros. Os dados originais medidos no acionamento Ac#1, na bancada #1, foram utilizados para a avaliação de aplicação dos filtros. Esses dados foram obtidos sob um filtro passa-baixa ajustado no hardware para uma frequência de corte de 60 Hz, que engloba todo o intervalo de velocidade do acionamento, com v_{ini} de $261,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e v_{fin} de

314,2 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$. A Figura 4.33.a mostra os dados originais de torque e velocidade medidos em uma das rampas do acionamento. É possível observar o comportamento característico do acionamento proposto, mas com os ruídos e oscilações ainda muito presentes nos dados. A seleção do filtro deve levar em consideração as características de capacidade de eliminação de ruídos e ao mesmo tempo deve preservar as características do fenômeno físico que os dados representam.

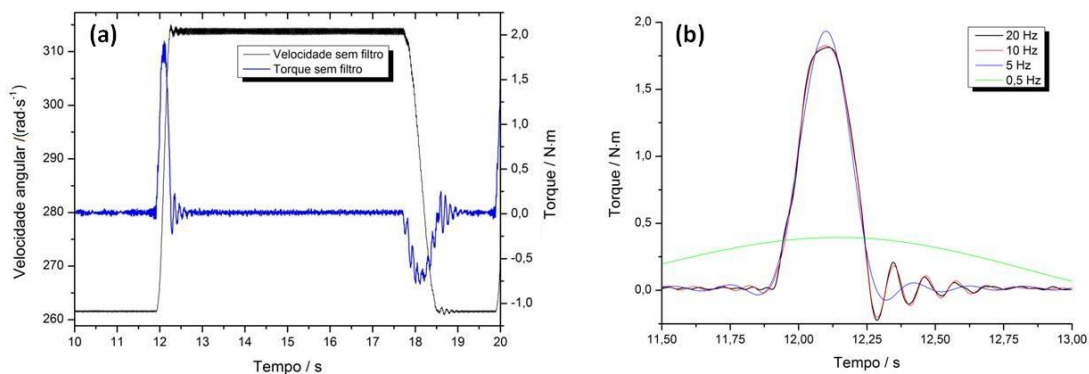


Figura 4.33 – (a) Curvas de torque e velocidade originais; (b) Curvas de torque com aplicação de diferentes filtros.

Aos dados de torque foram aplicados quatro filtros passa baixa com frequências de corte diferentes e os resultados estão mostrados na Figura 4.33.b. Os filtros estáticos de frequência de corte máxima em 0,5 Hz, são geralmente aplicados nas calibrações com esse princípio e mostra a total incompatibilidade com as características dinâmicas do regime. Os valores filtrados com 5 Hz apresentam uma boa suavização nas regiões do acionamento mas com a característica específica de aumentar a amplitude de pico e alterar os patamares inicial e final, não correspondendo ao fenômeno físico do regime medido. O mesmo acontece para a frequência de 10 Hz, porém com uma diferença mais suave e presente somente no patamar inicial da curva.

O filtro com frequência de corte em 20 Hz obteve o comportamento a ser considerado mais adequado à representação do regime, pois ao mesmo tempo que elimina os ruídos, ele consegue preservar as características do acionamento como o início rápido da curva, um pico bem definido e a oscilação de controle no patamar final.

A fim de evitar a defasagem ou uma perda de amplitudes entre os sinais de torque e velocidade, o mesmo filtro aplicado aos dados de torque deve ser aplicado também aos dados de velocidade. A Figura 4.34 mostra as curvas de torque e velocidade com o filtro passa baixa aplicado em cada grandeza.

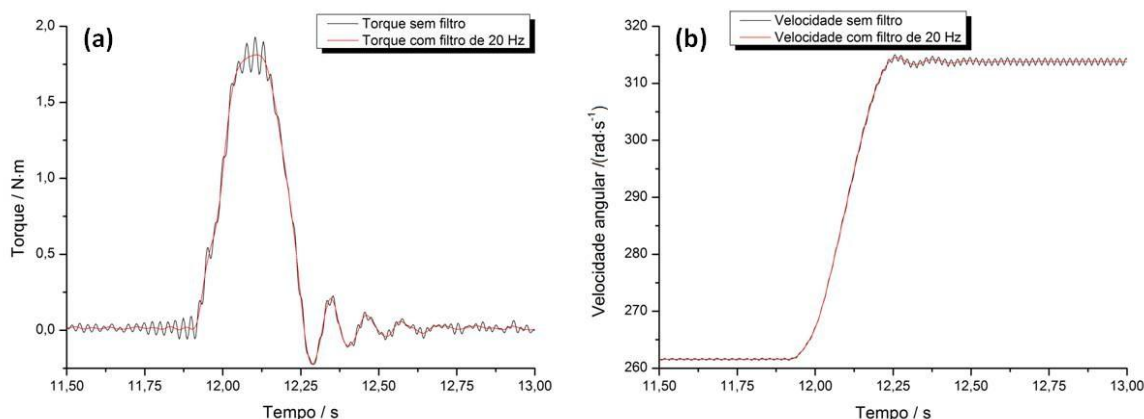


Figura 4.34 – Curvas originais e com filtro passa baixa de 20 Hz para: (a) os dados de torque e (b) os dados de velocidade.

Dos dados originais dos experimentos na bancada #1, é importante avaliar, além da curva de acionamento nas rampas de aceleração, os patamares de torque inicial e final a essas rampas. Uma análise de FFT foi aplicada em cada patamar de torque e foi possível comparar o espectro de frequência determinado com os dados de velocidade, ou oscilação, aplicados no controle. Esta comparação entre dados de uma grandeza obtidos com sensores diferentes funciona muito bem como uma avaliação da cadeia de medição que está sendo aplicada. A Figura 4.35.a mostra a análise de FFT para o patamar inicial onde um pico de frequência em 41,61 Hz ($261,4 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) foi encontrado, o que é compatível com a frequência ou velocidade medida no patamar que, retirada do gráfico da Figura 4.34.b, foi de $261,6 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$. A mesma compatibilidade foi encontrada na análise do patamar final (Figura 4.35.b), onde os valores são $314,1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ e $313,8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ para a análise FFT e a curva de velocidade respectivamente.

Em ambos os gráficos é importante notar a magnitude dessas oscilações e fazer uma análise do quanto elas representam em termos relativos aos valores nominais atingidos no acionamento da curva de aceleração. Em ambos os patamares o valor de magnitude se manteve estável atingindo $0,0144 \text{ N}\cdot\text{m}$ e $0,0149 \text{ N}\cdot\text{m}$ para os patamares inicial e final respectivamente.

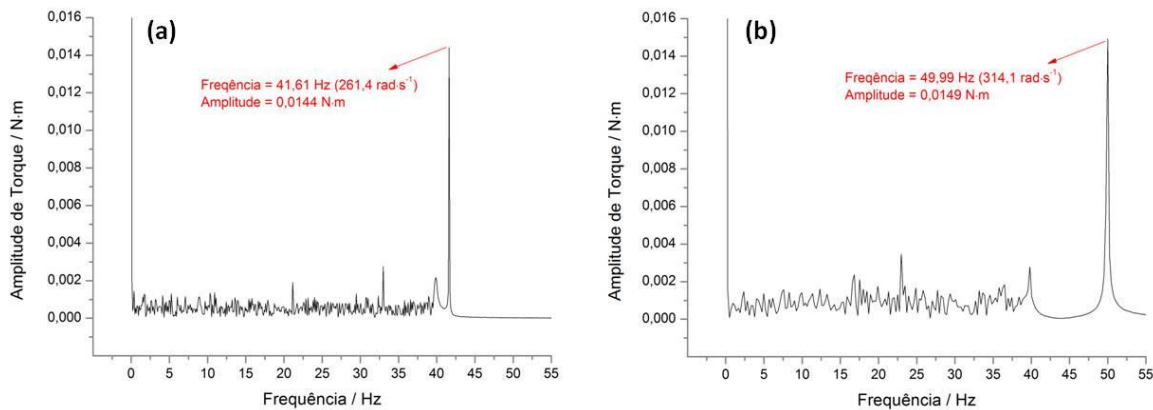


Figura 4.35 – Patamares de velocidade: (a) v_{ini} do degrau #1; (b) v_{fin} do degrau #1; (c) v_{ini} do degrau #2; (d) v_{fin} do degrau #2.

Cabe destacar que, baseado nos estudos anteriores com a simulação e as próprias análises dos dados obtidos na bancada #1, essas oscilações muito pouco influenciam na porção do acionamento referente aos regimes de aceleração, mas deve ser tomados em conta na determinação do torque de tara do transdutor (T_{tra_tar}).

No momento de ajuste dos equipamentos para a calibração, é importante que as informações a respeito dos filtros estejam disponíveis para o operador do sistema de calibração dinâmica. É comum por exemplo que amplificadores digitais tenham vários canais de conexão de sensores, sendo que cada um pode ter uma configuração diferente de filtragem. A atribuição e identificação correta desses filtros é componente definitiva para a garantia de uma boa rastreabilidade ao equipamento em calibração.

No capítulo 2.5.1 foram discutidos alguns resultados obtidos de estudos com a variação do filtro para aplicações estáticas ou de torque contínuo, que mostraram como podem se diferenciar os dados a depender da frequência de corte. Fica evidente portanto que, um instrumento calibrado com filtro de característica tipicamente estática, não atenderá uma aplicação com filtro de maior frequência de corte, aplicado dinamicamente.

4.3.3 Estudos sobre a sequência de processamento (derivação)

Como já foi explicado na proposta e no decorrer do estudo, o valor de aceleração é obtido pela derivação do sinal de velocidade medido no *encoder*. Para

esse cálculo da aceleração alguns questionamentos básicos podem ser feitos e podem orientar um breve estudo deste procedimento sobre: a equação utilizada na derivação e a influência da variação na sequência de processos, de filtragem e derivação, aplicados até a obtenção dos dados finais da grandeza.

Sobre a equação de cálculo da derivada, duas formas principais podem ser discutidas: a forma causal e a forma central. A primeira faz o cálculo considerando a variação da velocidade entre o instante de tempo atual i e os instantes passados, como $i - 1$ por exemplo. A segunda forma considera os dados de velocidade nos instantes anterior e posterior ao instante que se está estimando, ou seja, $i - 1$ e $i + 1$, como foi utilizado nos testes das bancadas #1 e #2. A partir de uma mesma massa de dados de velocidade, pode-se verificar que existe uma defasagem entre esses sinais, com o método causal estando atrasado em relação ao central. A Figura 4.36 mostra as curvas de aceleração calculadas das duas formas e a curva de torque que foi medida no acionamento. Os valores foram normalizados de forma a facilitar a comparação e visualização da sincronização.

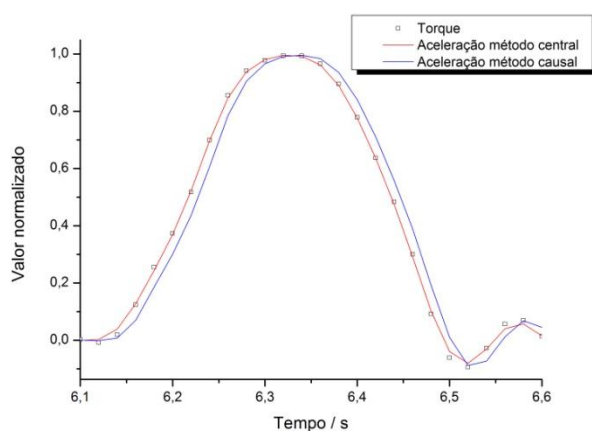


Figura 4.36 – Curvas normalizadas de torque e aceleração para comparação entre os métodos de derivação.

Percebe-se a defasagem entre os sinais de aceleração ao mesmo tempo em que, o sinal de torque está sincronizado com o sinal de aceleração proveniente do método central de cálculo. Nesse estudo, percebe-se que o método central é o mais indicado. Quanto menor for a resolução das curvas, devido à menor taxa de amostragem ou o tempo de aceleração real, mais evidente pode ser essa defasagem. A vantagem do método causal é poder realizar o cálculo da aceleração em tempo real (*online*).

O capítulo anterior tratou principalmente do processamento dos dados de torque no que se refere a sua filtragem. Ao se definir qual tipo de filtro aplicar, o mesmo deverá ser aplicado ao sinal original medido da velocidade. Por serem dados de sensores com um princípio de funcionamento diferente, as curvas também terão sensibilidades diferentes aos filtros aplicados.

A derivação de um sinal é um processo conhecido por amplificar as imperfeições que estejam presentes nos dados originais. Apesar da curva de velocidade ser mais bem definida e apresentar menos ruído que a curva de torque, que é original de um sensor analógico extensométrico, quaisquer imperfeições nos dados de velocidade, ao passarem pelo processo de derivação para a estimativa da aceleração, serão amplificadas e podem levar a dados infieis ao processo.

A sequência aplicada ao processo de derivação deve ser estudada no sentido de avaliar, nos processos mais usados, se existem diferenças e como elas se mostram nos sinais finais. A Figura 4.37.a mostra as duas sequências de processo de derivação e a alternância de posicionamento do filtro.

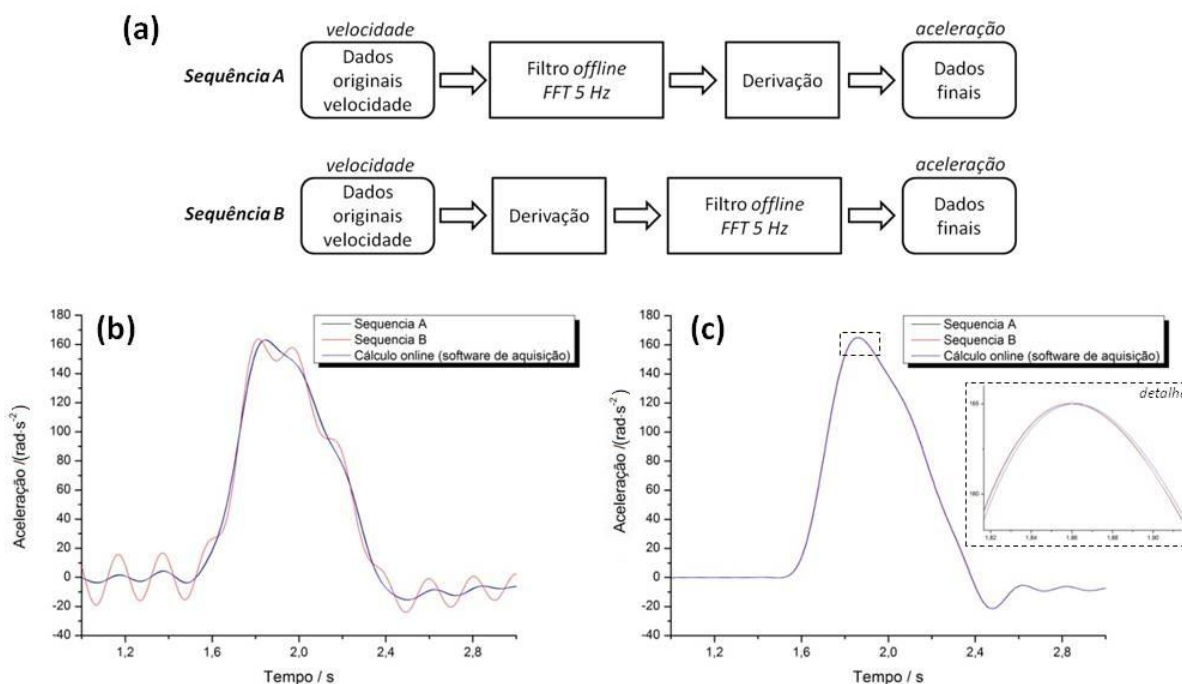


Figura 4.37 – (a) Sequências para derivação do sinal de velocidade; (b) Curvas de aceleração calculadas a partir de dados originais de velocidade sem filtro; (c) Curvas de aceleração calculadas a partir de dados originais de velocidade com filtro *online* de 50 Hz.

A 'sequência A' aplica, aos dados originais de velocidade, o filtro FFT com frequência de corte de 5 Hz para o acionamento tomado como exemplo e em seguida a derivação, pelo método central, para estimar os dados finais de

aceleração. A 'sequência B' inverte as posições do bloco de filtro com o bloco de derivação do sinal.

A Figura 4.37.b mostra os resultados de ambas sequências para os dados originais sem filtro. A Figura 4.37.c mostra os resultados de ambas as sequências aplicadas à massa de dados originais de velocidade com filtro FFT de 50 Hz *online* no momento da amostragem.

É possível observar que, nos dados originados sem filtro, a variação do posicionamento dos blocos gera dados ainda com oscilações que o filtro *off-line* de 5 Hz não foi capaz de eliminar. Na condição em que os dados são pré filtrados em 50 Hz, essas oscilações não aparecem e ambas as sequências geram exatamente os mesmos dados.

Ainda na Figura 4.37, uma terceira curva de dados em (b) e (c) representa os valores de aceleração calculados em tempo real pelo software de aquisição. A seleção do filtro utilizado nessa aquisição é realizada automaticamente pelo próprio software baseado nos parâmetros de taxa de amostragem e filtro *online* selecionados para o canal de leitura. Trata-se de um processo causal e o detalhe na Figura 4.37.c mostra que, embora o perfil esteja bem assemelhado àquele gerado pela derivação *off-line*, existe a defasagem entre os sinais, já explicada anteriormente no capítulo 4.3.2 para o exemplo de tratamento nos dados de torque.

4.4 Incerteza de Medição

Esta seção tem o objetivo de mostrar e discutir algumas abordagens que venham servir de substrato às soluções para o cálculo da incerteza de medição no torque dinâmico. Dentro da organização do texto e da própria metodologia de pesquisa proposta, a apresentação e inserção dos conceitos de incerteza inerentes ao processo em estudo foram realizadas somente após a prática dos testes, simulações e das conclusões parciais. Este capítulo funciona também como uma concatenação dos resultados obtidos e uma projeção sobre a capacidade metrológica do conjunto sistema mais metodologia de calibração.

Os estudos que tratam de novas abordagens para a calibração do torque dinâmico e sua rastreabilidade (ver capítulo 2.5) não abordam o cálculo da incerteza

dinâmica nos detalhes necessários, ou seja, não demonstram como considerar os efeitos dinâmicos inerentes de medições desta natureza. Isso se deve ao fato de que as discussões sobre o torque dinâmico ainda se ambientem na etapa de projeto e prova de conceitos para adaptação de princípios para a construção de sistemas capazes de realizar a grandeza e transferi-la aos transdutores, conforme conteúdo apresentado no capítulo 2.5.

Neste ponto é importante definir que a dinâmica do regime proposto tem especificidades que definirão a melhor abordagem no momento do tratamento dos dados visando a estimativa da incerteza de medição. Como já foi demonstrado nos testes realizados, ao mesmo tempo em que são geradas curvas de carregamentos de torque com uma boa estabilidade e repetibilidade, tanto com valores de referência quanto do sensor em teste, o que pode remeter a uma análise estatística entre pontos de medição muito semelhante àquela aplicada aos regimes estáticos, existem elementos de processamento de sinais, de manipulação de dados e da própria metodologia de comparação entre os valores de torque que devem ser considerados e agregados à caracterização dessas curvas. A natureza dinâmica do processo determina que qualquer resultado de medição seja referenciado aos parâmetros de ajuste dos equipamentos e da metodologia de medição em que foram obtidos, pois a influência desses parâmetros se mostrou mais determinante para a variação dos resultados finais do que poderia acontecer em uma calibração estática tradicional desses sensores. O mesmo acontecerá portanto na estimativa para a incerteza de medição.

A metodologia tradicional apresentada pelo GUM⁹⁵ de propagação das incertezas a partir da derivação das grandezas no modelo pode ser aplicada ao tratamento das curvas de torque mas com uma devida consideração a respeito da iteração entre os dados.

A incerteza de medição é a indicação quantitativa da qualidade dos resultados de medição. O procedimento de estimativa da incerteza de medição de determinado mensurando pode ser resumido nos seguintes passos:

- 1) modelagem do mensurando;
- 2) elaboração do diagrama causa-efeito;
- 3) estimativas das incertezas das fontes de entrada;
- 4) coeficientes de sensibilidade;

- 5) cálculo das componentes de incerteza na unidade do mensurando
- 6) combinação das componentes;
- 7) cálculo dos graus de liberdade efetivo e determinação do fator de abrangência;
- 8) estimativa da incerteza expandida.

Uma boa fundamentação do mensurando possibilita a elaboração de um diagrama causa-efeito adequado e estimativas de incerteza mais realistas.

A definição das curvas de torque engloba processos como filtragem e derivação de sinais que trabalham as vizinhanças dos dados, ou seja, a correlação entre os pontos consecutivos de uma mesma curva deverá ser considerada. Essa iteração pode estar explícita no modelo do mensurando ou embutida em alguns dos procedimentos de definição de parâmetros.

Nas duas propostas de apresentação de resultados de calibração dinâmica do torque por comparação direta ou por comparação indireta, as abordagens de incerteza de medição também serão diferenciadas.

4.4.1 Modelo do mensurando para comparação direta

O modelo do mensurando a ser utilizado pode ser aquele definido a partir do erro de medição, calculado para a comparação direta entre os valores de torque. Dentro dessa modelagem do erro, outras grandezas estão definidas e que terão suas contribuições particulares. De uma forma geral, o mensurando é definido para cada instante indexado da curva conforme Equações 25, originada da ampliação da Equação 5, onde os componentes já foram apresentados e definidos no decorrer do texto.

$$\begin{aligned}
 E_{(j)} &= \bar{T}_{tl(j)} - \bar{T}_{ir(j)} = \\
 E_{(j)} &= \left((\bar{T}_{tb(j)} - \bar{T}_{tz}) - (\bar{T}_{tbi(j)} - \bar{T}_{tzi}) \right) + \\
 &\quad - (\bar{\alpha}_{(j)} \cdot \theta_{ref})
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Cabem aqui algumas considerações a respeito dessas componentes do modelo no que se refere as fontes de incerteza decorrentes de rastreabilidade, dos perfis de carregamento, da estabilidade das leituras e da metodologia de calibração.

Para os valores obtidos do transdutor de torque, identificados nos componentes de radical T_t na primeira parcela da Equação 25, informações úteis serão extraídas da calibração estática do sensor. As incertezas de medição obtidas dessas calibrações estáticas devem ser integralmente consideradas, uma vez que um dos objetivos da calibração dinâmica é a validação dinâmica da caracterização estática do sensor. Esses valores do transdutor se combinam e definem os valores de torque líquido. Como já foi mostrado, além das contribuições pela incerteza da calibração estática, nesse método estão contribuindo para a incerteza de medição a estabilidade dos dados utilizados para definir os valores de torque de tara e as dispersões entre as leituras brutas da grandeza, caracterizando a repetibilidade.

Dentro desses valores medidos de torque já estão considerados aquelas componentes parasitas que possam estar acontecendo. Como as curvas de carregamento se iniciam e terminam no patamar nulo com o sensor em rotação, componentes sistemática que possam vir a compor um coeficiente de correção não são acolhidas e todas as contribuições serão portanto consideradas como variação da grandeza dentro do conceito de incerteza de medição.

Para o torque inercial de referência (T_{ir}), equivalente à segunda parte da equação do modelo, as principais grandezas envolvidas, aceleração angular e momento de inércia de massa, são também funções de outros parâmetros.

Para o momento de inércia de massa, a incerteza de medição terá a contribuição das medições geométricas do corpo inercial, como por exemplo, o diâmetro e a largura do disco inercial acoplado ao eixo, além das medições de massa deste corpo. A ordem de grandeza destes valores de incerteza dependerá da qualidade demandada para cada componente, o que está diretamente relacionado aos sistemas padrões nos quais serão calibrados.

A aceleração angular por sua vez terá como contribuições principais a estimativa de sua incerteza padrão, decorrente da calibração do *encoder*, da variação da constante de intervalo de tempo no período da medição e da dispersão da média da grandeza entre as curvas aplicadas. A equação de derivação está inserida no modelo metrológico da aceleração.

Importante destacar que o torque inercial de referência e sua incerteza devem ser estimados também da caracterização do sistema padrão. Essa caracterização constitui um procedimento isolado e prévio à calibração de sensores.

Com as considerações postas, propõe-se então, na Figura 4.38, um diagrama causa-efeito que apresenta as diversas contribuições fontes de incerteza para as grandezas de entrada do mensurando considerado na calibração.

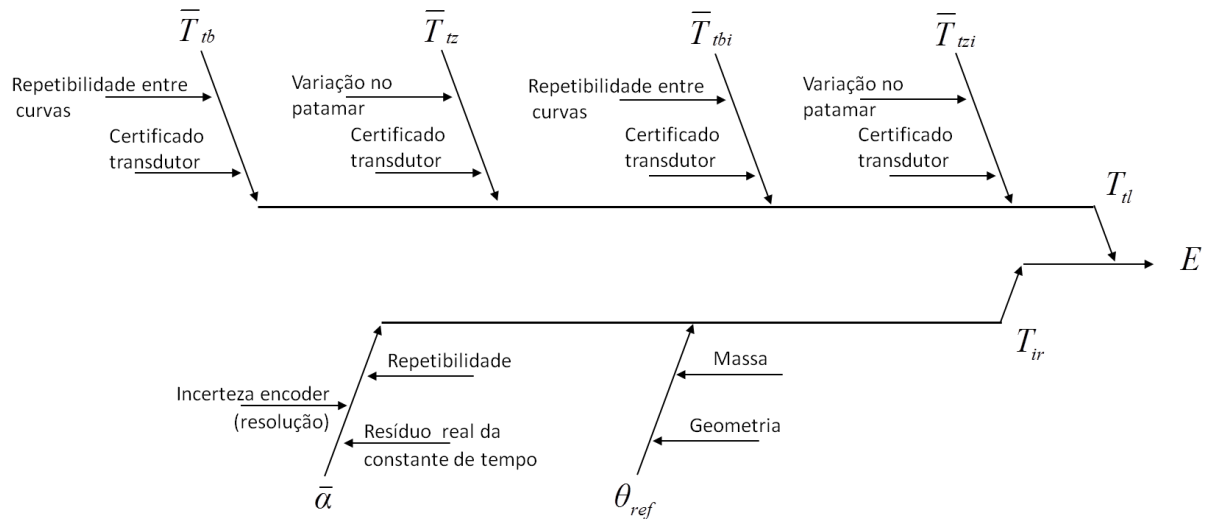


Figura 4.38 – Diagrama causa efeito para as principais fontes de contribuição na estimativa da incerteza de medição do mensurando E .

Notadamente, a parte superior do diagrama representa os torques medidos pelo transdutor de torque enquanto que a parte inferior representa o torque de referência.

As componentes para o momento de inércia de massa de referência contém outras ramificações, com a maior especificidade principalmente da geometria do disco, que serão discutidas mais a frente neste capítulo.

A seguir estão apresentados os desenvolvimentos para o cálculo de cada componente de incerteza identificados juntamente com uma breve descrição da rastreabilidade para o caso dos equipamentos e práticas de medição realizadas durante os testes.

4.4.1.1 Contribuições referentes ao certificado de calibração do transdutor

Os transdutores de torque deverão ser calibrados estaticamente e, como já foi exposto no capítulo 2.4.4, essa calibração incluirá os principais parâmetros para a descrição e caracterização estática do sensor, o que inclui a incerteza de medição da máquina padrão em que o transdutor foi calibrado. A Tabela 4.16 apresenta valores de incerteza de medição (U_{CerT}), no fundo de escala, de alguns modelos de transdutores⁴⁶.

Tabela 4.16 - Valores de incerteza típicos para transdutores de torque calibrados estaticamente (1).

<i>Modelo</i>	TB2	T5	T10	T12
<i>Tipo</i>	flange / estático	eixo / dinâmico	flange / dinâmico	flange / dinâmico
$U_{CT} (k = 2)$	0,03 %	0,1 %	0,1 %	0,03 %

A contribuição padrão tipo B desse parâmetro, denominada aqui de u_{CT} é portanto equivalente à Equação 26. Essa componente será repetida para as quatro grandezas de entrada referentes às leituras de torque, o que deverá ser considerada como uma situação de correlação total entre as componentes.

$$u_{CerT(j)} = \frac{U_{CerT(j)}}{k} \quad (26)$$

Outro fato a ser observado é que essas leituras estão em faixas distintas da escala. Por exemplo, os valores de torque de tara estão muito próximo de zero enquanto os torques brutos podem estar atingindo faixas nominais do transdutor acima de 50%.

Nas calibrações estáticas, um comportamento comum dos transdutores é apresentar um valor de incerteza mais alto no início da sua faixa nominal. Portanto, a incerteza de medição U_{CT} a ser considerada do certificado de calibração, deverá ser aquela que engloba toda a faixa ou a maior parte dela ou então a indexação j deverá ser mantida de forma a discriminar o ponto da faixa.

4.4.1.2 Contribuições referentes à repetibilidade entre curvas

Esta contribuição deve ser considerada para as duas grandezas de entrada referentes aos valores de torque bruto. A repetibilidade é medida pelo desvio padrão da média nas N curvas de acionamento. A seguir, exemplificando esta abordagem, estão as duas Equações 27 e 28 do torque bruto \bar{T}_{tra_bru} , sendo que a mesma interpretação deve ser dada para $\bar{T}_{tra_ini_bru}$. Interessante observar que o número total de curvas N , embora seja recomendado o mesmo para todos os acionamentos, pode por algum motivo ter sido diferente para algumas das configurações de inércia do eixo.

$$\bar{T}_{tb(j)} = \frac{1}{N_{tb}} \sum_{n=1}^{N_{tb}} T_{tb(j,n)} \quad (27)$$

$$S_{\bar{T}_{tb(j)}} = \sqrt{\frac{1}{N_{tb} - 1} \sum_{n=1}^{N_{tb}} (T_{tb(j,n)} - \bar{T}_{tb(j)})^2} \quad (28)$$

Observando sempre que estes parâmetros estão referentes a cada ponto de indexação j das curvas, as componentes de incerteza para essa contribuição estão identificadas na Equação 29, sendo u_{RT} e u_{RTi} referentes respectivamente às curvas de torque bruto $T_{tb}(j)$ e $T_{tbi}(j)$.

$$u_{RT} = \frac{S_{\bar{T}_{tb(j)}}}{\sqrt{N_{tb}}} \quad ; \quad u_{RTi} = \frac{S_{\bar{T}_{tbi(j)}}}{\sqrt{N_{tbi}}} \quad (29)$$

4.4.1.3 Contribuições referentes à variação nos patamares de tara

Os valores de torque de tara são obtidos no início do primeiro acionamento da série de N curvas da determinada configuração de inércia. O método de obtenção deste valor já foi abordado no capítulo 4.1.3, onde a Figura 4.9 mostra a oscilação do valor de torque existente nestes patamares. Em uma primeira abordagem, a dispersão desse sinal, seu desvio padrão, poderia representar a incerteza de medição no valor médio no trecho, como nas Equações 30 e 31 abaixo.

$$\bar{T}_{tz} = \frac{1}{N_z} \sum_{n_z=1}^{N_z} T_{tz(n_z)} \quad (30)$$

$$S_{\bar{T}_{tz}} = \sqrt{\frac{1}{N_z - 1} \sum_{n_z=1}^{N_z} (T_{tz(n_p)} - \bar{T}_{tz})^2} \quad (31)$$

Onde N_z significa o número total de valores de torque tomados em conta no patamar em estudo. Importante distinguir que este número de pontos N_z é diferente do número de valores N considerados do total de curvas. É interessante que para os

acionamentos com as duas condições distintas de inércia seja mantido o mesmo número de pontos tomados no patamar de tara. O desenvolvimento das equações utilizou o patamar de \bar{T}_{tz} como exemplo, mas o mesmo entendimento deve ser aplicado a \bar{T}_{tzi} para cada configuração inercial.

No entanto, é necessário considerar a autocorrelação entre os dados de torque presentes no trecho selecionado do patamar. A autocorrelação entre dados é particularmente uma característica de processos que utilizam altas taxas de amostragem. Como foi apresentado no capítulo 4.3.2, através da Figura 4.35, a variação dos dados de torque se encontram de forma periódica senoidal, com frequência de oscilação equivalente à velocidade angular inicial do acionamento.

De acordo com⁹⁶, quando repetidas medições são autocorrelacionadas, não é apropriada a abordagem tradicional, que considerada a independência dos dados, para cálculo da incerteza de medição da média, devendo este valor de incerteza passar por uma correção. A ferramenta utilizada para quantificar esse parâmetro é a função de autocorrelação (ACF), que combinada com referências aos padrões normais de dados independentes, como um ruído branco, fornecem as bases para uma metodologia de cálculo da incerteza de medição em dados autocorrelacionados. A Figura 4.39 mostra o resultado da aplicação da análise de autocorrelação via software Minitab, aos dados de torque do patamar de tara do acionamento sem disco, com t_a de 3,0 s, da bancada #2. Foi selecionado um período de 1 s no patamar, que com a taxa de 300 Hz, corresponde a 300 valores de torque, logo antes da primeira curva de acionamento.

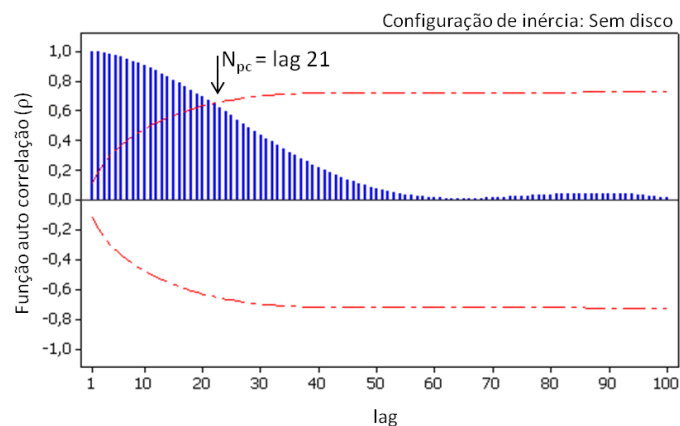


Figura 4.39 –Gráfico da função autocorrelação para os dados do patamar de tara anterior a primeira curva de carregamento do eixo sem disco, com nível de significância de 95%.

As barras azuis constituem a ACF e as linhas vermelhas, simétricas em relação ao eixo zero, representam os limites de envelope para que as ACFs ali contidas representem um processo estatisticamente independente. O eixo das abscissas representa os intervalos de tempo, do inglês *lag*, entre uma leitura e as demais subseqüentes. Tomando um ponto da amostra de referência, que será o *lag* zero, a ACF mostrará a sua correlação com os demais pontos, em *lags* diferentes da amostra. Conforme se aumenta o *lag*, a correlação entre pontos diminui e tende a zero.

Ainda de acordo com⁹⁶, a incerteza dos dados de torque no patamar (u_{PT}) é calculada conforme Equação 32.

$$u_{PT}^2 = \left(1 + \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{N_{pc}} (N_z - i) \cdot \rho_{(i)}}{N_z} \right) \cdot \frac{S_{Ttz}^2}{N_z} \quad (32)$$

Onde:

- ρ Função auto correlação no ponto
- N_z Número de pontos no trecho avaliado do patamar
- N_{pc} Último ponto com ACF fora dos limites de significância

Observa-se que, caso a primeira parte da equação se iguale a 1, condição para os sinais independentes, a segunda parte da equação representa a incerteza decorrente da variância tradicional, calculada de acordo com o GUM.

O ponto N_{pc} representa o último ponto com ρ fora da região para condição de independência entre os dados, ou seja, além do limite de significância para uma probabilidade de 95%. No exemplo da Figura 4.39, N_{pc} está no *lag* 21. A correção ao valor da variância tradicional deverá ser feita considerando portanto os valores de ρ dos pontos até N_{pc} .

A quantificação da diferença entre os valores de incerteza no patamar considerando e não considerando as correlações será demonstrado no exemplo numérico para a estimativa da incerteza no Capítulo 4.4.1.8.

4.4.1.4 Incerteza padrão combinada para torque medido

Essa primeira parte das contribuições da incerteza de medição no método comparativo direto se referem às grandezas do torque medido no transdutor. Essas

contribuições podem, portanto, serem combinadas em uma componente padrão que representa o torque líquido medido ($u_{c_{tl}}$).

Os coeficientes de sensibilidade (Ci) de cada grandeza de entrada devem ser calculados através das respectivas derivadas parciais do modelo. A Equação 33 mostra os coeficientes de sensibilidade calculados para as grandezas de entrada da componente \bar{T}_{tl} .

$$Ci_{T1} = \frac{\partial T_{tl}}{\partial \bar{T}_{tb}} = 1 ; \quad (33.1)$$

$$Ci_{T2} = \frac{\partial T_{tl}}{\partial \bar{T}_{tz}} = -1 ; \quad (33.2)$$

$$Ci_{T3} = \frac{\partial T_{tl}}{\partial \bar{T}_{tbi}} = -1 ; \quad (33.3)$$

$$Ci_{T4} = \frac{\partial T_{tl}}{\partial \bar{T}_{tzi}} = 1 \quad (33.4)$$

Para a incerteza padrão combinada das componentes, a seguinte nomenclatura será adotada no intuito de facilitar o entendimento do desenvolvimento das equações:

u_{T11}	Incerteza padrão de certificado na curva (torque bruto com inércia)
u_{T12}	Incerteza padrão de repetibilidade na curva (torque bruto com inércia)
u_{T21}	Incerteza padrão de certificado no patamar curva (torque de tara com inércia)
u_{T22}	Incerteza padrão de variação no patamar (torque de tara com inércia)
u_{T31}	Incerteza padrão de certificado na curva (torque bruto inicial)
u_{T32}	Incerteza padrão de repetibilidade na curva (torque bruto inicial)
u_{T41}	Incerteza padrão de certificado no patamar curva (torque de tara inicial)
u_{T42}	Incerteza padrão de variação no patamar (torque de tara inicial)

As componentes u_{T11} , u_{T21} , u_{T31} e u_{T41} são incertezas tipo B obtidas do mesmo certificado de calibração do transdutor de torque e portanto apresentam uma correlação direta que deve ser considerada. Segundo⁹⁵ essa correlação entre as

componentes deve ser realizadas de duas em duas, considerando um coeficiente de correlação $r(u_i, u_j)$ entre elas, que neste caso será equivalente a 1 por se tratar de uma correlação total e positiva entre as variáveis.

Como exemplo ilustrativo, toma-se somente as grandezas \bar{T}_{tb} e \bar{T}_{tz} , componentes de \bar{T}_t . Desenvolvendo a equação para a incerteza combinada entre as componentes dessas duas grandezas e considerando a correlação entre as componentes u_{T11} e u_{T21} , relacionadas ao certificado de calibração estática do transdutor, obtém-se a Equação 34 para a incerteza combinada.

$$u_{c_{Te}} = [(Ci_{T1} \cdot u_{T11})^2 + (Ci_{T2} \cdot u_{T21})^2 + 2 \cdot (Ci_{T1} \cdot Ci_{T2} \cdot u_{T11} \cdot u_{T21} \cdot r(u_{T11}, u_{T21}))]^{1/2} \quad (34)$$

A Equação 35 mostra o cálculo da incerteza combinada do torque medido no transdutor, considerando as incertezas das quatro grandezas de entrada, com os valores de coeficiente de sensibilidade e coeficiente de correlação considerado 1. As demais incertezas são do tipo A, considerando variações das leituras e portanto não são correlacionadas.

$$u_{c_{tl}} = [(u_{T11}^2 + u_{T21}^2 + u_{T31}^2 + u_{T41}^2) + 2 \cdot ((-1 \cdot u_{T11} \cdot u_{T21}) + (-1 \cdot u_{T11} \cdot u_{T31}) + (1 \cdot u_{T11} \cdot u_{T41}) + (1 \cdot u_{T21} \cdot u_{T31}) + (-1 \cdot u_{T21} \cdot u_{T41}) + (-1 \cdot u_{T31} \cdot u_{T41})) + (u_{T12}^2 + u_{T22}^2 + u_{T32}^2 + u_{T42}^2)]^{1/2} \quad (35)$$

O próximo passo da sequência de estimativa da incerteza de medição, segundo o método de propagação das incertezas, deverá ser o cálculo dos graus de liberdade efetivos (v_{eff}) e por fim a estimativa do fator de abrangência (k). No entanto, esses passos só serão tomados também para a grandeza torque de referência ao final da apresentação das componentes de incerteza.

4.4.1.5 Contribuições referentes à incerteza de medição da aceleração

O levantamento das contribuições de incerteza na aceleração vai englobar tanto as contribuições de velocidade, oriundas do *encoder*, quanto as contribuições

da grandeza tempo, que envolve características do sistema DAQ. A Equação 36 mostra o método de derivação do sinal de velocidade com as indexações em j e nas curvas n .

$$\alpha_{(j,n)} = \frac{(\omega_{(j+1,n)} - \omega_{(j-1,n)})}{2 \cdot \Delta t} = \frac{\Delta\omega_{(j,n)}}{2 \cdot \Delta t} \quad (36)$$

A rastreabilidade à grandeza velocidade é um ponto crítico no sistema padrão proposto pois, não existe uma metodologia ou um sistema de referência definido para a calibração direta dos valores de velocidade medidos pelos *encoders*, sejam eles incrementais ou absolutos. Em alguns equipamentos, como os que foram utilizados nos experimentos, os deslocamentos são medidos pelo encoder acoplado ao eixo de medição mas os dados são apresentados diretamente em forma de velocidade. A transformação do deslocamento angular em velocidade angular é feito ainda em nível de hardware quando a contagem dos pulsos que passam pelo sensor de infravermelho do *encoder* é zerada a cada pulso do *clock* de referência em determinado intervalo de tempo.

Nessa parte da pesquisa foram realizadas consultas e entrevistas com especialistas da área de metrologia dimensional, que puderam orientar a pesquisa quanto à rastreabilidade desses equipamentos e quanto a possíveis valores de incerteza atingíveis para a medição de deslocamento angular do sensor.

Geralmente esses equipamentos são calibrados com uma maior atenção às indicações do deslocamento angular e os seguintes métodos são encontrados:

- Método primário estático de comparação a um padrão de ângulo
- Método da autocalibração que considera as variações de leitura do próprio encoder e busca pela verificação de seu alinhamento na montagem.
- Verificação da temporização entre os pulsos medidos do encoder ou a quantização dos incrementos dos pulsos num determinado período.
- Comparação entre dois *encoders* sendo que o instrumento a ser considerado padrão deve ter uma resolução melhor que o encoder em calibração.

Importante ressaltar que nenhum desses métodos é reconhecidamente indicado para a calibração dos sensores na grandeza velocidade angular. As considerações a respeito da incerteza de medição a ser estimada para os *encoders*

foram baseadas na avaliação dos seguintes parâmetros e informações, sob uma proposta de superestimação:

- A capacidade e a limitação do sistema DAQ em ler as ranhuras (possível correção)
- A resolução mecânica ou o número de ranhuras no disco ótico
- A relação deslocamento angular *versus* velocidade angular nas curva dos acionamentos
- As informações técnicas relevantes presentes nos *data-sheets* dos sensores e bibliografia

A capacidade do DAQ de ler todos as ranhuras que passem pelo sensor IR, sob os regimes com as várias velocidades pretendidas no processo de calibração, garante a manutenção da resolução mecânica do encoder. Por exemplo, para uma velocidade máxima pretendida de 3500 rpm ($366,52 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$), um encoder com resolução mecânica de 360 ranhuras irá necessitar de uma capacidade mínima de leitura de $21.000 \text{ pulsos}\cdot\text{s}^{-1}$, enquanto que um encoder com 10.000 ranhuras necessita de uma capacidade de leitura do hardware de $583.333 \text{ pulsos}\cdot\text{s}^{-1}$. Ambos os sistemas DAQ utilizados nas bancadas #1 e #2 tem capacidade de leitura máxima de até $10^6 \text{ pulsos}\cdot\text{s}^{-1}$ ⁹⁷, deixando bem coberta as necessidades de leitura e não configurando uma fonte de erro, caso não estivesse lendo todas as ranhuras que estivessem passando pelo sensor.

Os sensores de torque têm em sua especificação técnica algumas informações que podem ser consideradas para estimativa da incerteza do sensor, mesmo que para manter uma posição conservadora ao atrelar a incerteza à estimativa do deslocamento angular dentro do intervalo de tempo medido. O *data-sheet* do transdutor utilizado na bancada #2 declara uma precisão de 150 ppm (0,015%) e um desvio de 1,5 rpm no valor nominal de velocidade do sensor⁹¹, embora não cite o método utilizado para tal estimativa. Já o modelo de transdutor da bancada #1 não apresenta nenhuma referência específica para a precisão de velocidade⁹⁰, e a informação comum em ambas as especificações técnicas é a resolução mecânica, porém, como os dois sistemas tem o mesmo princípio, o valor de precisão em velocidade indicado em⁹¹ pode ser atribuído a ambos.

Incerteza de medição da velocidade considerada na unidade direta da grandeza:

Se a incerteza de velocidade for considerada diretamente na grandeza, ou seja, copiando as informações técnicas obtidas dos manuais do transdutor modelo T12, o valor de incerteza (u_{ω}) pode ser considerado diretamente equivalente ao seu valor de desvio de 1,5 rpm na capacidade máxima de medição que é 15.000 rpm, que equivale a aproximadamente 0,010%. Este valor percentual pode então ser expandido para toda a faixa de medição e também atuar nos intervalos $\Delta\omega$ dos pontos as curvas, Equação 37 abaixo.

$$u_{\omega(j)} = u_{\omega} \quad \text{para } (j = 1 \text{ até } J) \quad (37)$$

Incerteza de medição da velocidade considerada a partir da unidade de deslocamento angular:

Se os valores de incerteza do *encoder* se referirem às especificações de capacidade de medição de deslocamento angular $\Delta\beta$ do sensor, então passam a ser consideradas as informações de ângulo presentes nas especificações técnicas ou outra referência de rastreabilidade confiável. Basicamente, a informação mais importante do manual destes equipamentos é a resolução adotável na leitura. Outra possível fonte de incerteza para a medição do deslocamento angular é a incerteza do certificado, que já considera a resolução do mesmo^[1]. Considerando a distribuição retangular dessa componente, pode-se definir a incerteza de ângulo (u_{β}) através da equação 38.

$$u_{\beta} = \frac{Res_{Enc}}{\sqrt{3}} \quad (38)$$

Onde Res_{Enc} significa a resolução de leitura, na unidade de ângulo radianos, adotada para as medições. Tomando como exemplo os modelos T10 e T12, o disco tem 360 ranhuras, porém é possível ajustar as leituras para um resolução equivalente a 720 ranhuras utilizando o método de dupla frequência de leitura (ver Figura B.4). O impacto de uma melhor resolução no resultado de incerteza deve ser

¹ No caso das práticas realizadas para esta tese, como não houve uma prática de medição sobre esses sensores, a qual levasse à conclusões a respeito da rastreabilidade oriunda de uma calibração, optou-se pela abordagem direta à resolução.

avaliado juntamente as demais componentes do valor final de incerteza de medição para a aceleração, como o balanço entre fontes de incerteza aleatórias e não aleatória e conseqüentemente a combinação destas para a incerteza do torque de referência.

Definida uma incerteza u_β , constante para toda a faixa do encoder, é necessário transformá-la em dado de velocidade, o que será feito pela relação interna que mostre a variação das velocidades medidas em função das variações dos respectivos deslocamentos angulares. Essa relação interna representa na verdade um coeficiente de sensibilidade $Ci_{\omega\beta(j)}$ que transformará a incerteza de ângulo u_β em incerteza de velocidade u_ω .

Esses valores da variação angular devem ser estimados através da integração numérica do sinal de velocidade. Esta integração pode ser aplicada via software e as duas colunas de dados, representando ω e β , podem ser dispostas lado a lado e já serem consideradas as variações entre os pontos, conforme equações 39 e 40 a seguir.

$$Ci_{\omega\beta(j)} = \frac{\Delta\omega(j)}{\Delta\beta(j)} = \frac{(\omega_{(j+1)} - \omega_{(j-1)})}{(\beta_{(j+1)} - \beta_{(j-1)})} \quad (39)$$

$$u_{\omega(j)} = Ci_{\omega\beta(j)} \cdot u_\beta \quad (40)$$

Importante destacar que essas incertezas são para cada ponto da curva de aceleração durante o acionamento, embora tomem como ponto de referência uma incerteza u_β única para todos os pontos do *encoder*.

Após a explanação e definição das duas alternativas de cálculo da incerteza do dado de velocidade, retoma-se a Equação 36, onde os dois valores de velocidade no numerador da fração são obtidos pelo mesmo instrumento e portanto deve ser considerada a correlação entre esses dados, que é total. A incerteza da variação de velocidade ($u_{\Delta\omega(j)}$) por conseqüência será a combinada da diferença das incertezas nas velocidades, $u_{\omega(j-1)}$ e $u_{\omega(j+1)}$, como define então a equação 41, retirada de⁹⁵.

$$u_{\Delta\omega(j)} = u_{\omega(j+1)} - u_{\omega(j-1)} \quad (41)$$

Após a definição das incertezas dos intervalos de velocidades $u_{\Delta\omega}$, deve-se seguir para o desenvolvimento da incerteza da temporização utilizada no

denominador da equação de derivação da velocidade. Como já foi explicado anteriormente no texto, os dados obtidos dos sistemas DAQ estão divididos em três colunas, sendo que na primeira estão os dados do canal de base de tempo.

A temporização realizada via *hardware*, utilizando o *clock* do próprio sistema gerador de intervalos de tempo, tem incerteza de calibração, na faixa estudada entre 0,020 s (taxa de 50 Hz) e 0,0033 s (taxa de 300 Hz), alcançando valores em torno de 2,9 ns, de acordo a uma consulta à base de dados dos laboratórios acreditados da RBC⁸.

Como não foram realizadas as calibrações nos sistemas de aquisição utilizados nas práticas, este valor de incerteza pode ser adotado para esses equipamentos, mas antes é interessantes explorar também, para a estimativa da incerteza, os desvios entre os intervalos de tempo nominais, estipulados pela taxa de aquisição e os valores reais, gerados nos equipamentos.

Trabalhando-se os dados de tempo dos acionamentos realizados com uma taxa de aquisição de 50 Hz, o que deveria significar um intervalo de tempo de 0,02 s entre os dados, aumentando o número de casas decimais pôde-se verificar que o valor real desse incremento deveria ser acrescido de um valor de 0,95 ns. Outro fato observado foi a manutenção deste valor de intervalo em todo o período do teste, conferindo a estabilidade do dado.

O valor de incerteza ($U_{\Delta t}$) atribuído aos intervalos de tempo das práticas deve ser portanto equivalente a incerteza $3,0 \cdot 10^{-9}$ s, que é o valor arredondado da incerteza estimada de calibração desse equipamento.

Incerteza de medição combinada para aceleração (u_α):

Com as informações de incerteza para a grandeza velocidade ($u_{\Delta\omega}$) e para a grandeza de entrada tempo ($u_{\Delta t}$), pode-se definir a incerteza padrão da aceleração (u_α). Deve-se retomar a Equação 36 e calcular os coeficientes de sensibilidade para transformar esses valores de velocidade e tempo em dados de aceleração, conforme Equações 42 e 43.

$$Ci_{\alpha_\omega} = \frac{\partial \alpha}{\partial \Delta\omega} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t}; \quad (42)$$

$$Ci_{\alpha_t} = \frac{\partial \alpha}{\partial \Delta t} = -\frac{\Delta\omega}{2 \cdot \Delta t^2}; \quad (43)$$

Tratando de forma mais específica, a Equação 44 mostra a relação entre as componentes para formar a incerteza combinada de aceleração no ponto j da curva n .

$$u_{\alpha(j)} = \sqrt{\left(\frac{u_{\Delta\omega(j)}}{2 \cdot \Delta t}\right)^2 + \left(-\frac{u_{\Delta t} \cdot \Delta\omega(j)}{2 \cdot \Delta t^2}\right)^2}; \quad (44)$$

Incerteza de medição combinada para aceleração média ($u_{\bar{\alpha}}$):

A aceleração média de um determinado ponto j é a média das acelerações calculadas para as N curvas acionadas.

Antes de passar à equação que determina a incerteza combinada da aceleração, deve-se inserir a última componente dessa grandeza, que será a incerteza de medição referente à repetibilidade das medições sobre um valor de aceleração média ($\bar{\alpha}_{(j)}$), que é expressa conforme a Equação 45 a seguir.

$$\bar{\alpha}_{(j)} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \alpha_{(j,n)} = \frac{\alpha_{(j,1)} + \alpha_{(j,2)} + \dots + \alpha_{(j,N)}}{N} \quad (45)$$

a componente de incerteza da repetibilidade desses valores ($u_{R\bar{\alpha}(j)}$), ou seja, o desvio padrão dessa média nos determinados pontos indexado j , conforme Equações 46 e 47.

$$s_{\bar{\alpha}(j)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\alpha_{(j)} - \bar{\alpha}_{(j)})^2} \quad (46)$$

$$u_{R\bar{\alpha}(j)} = \frac{s_{\bar{\alpha}(j)}}{\sqrt{N}} \quad (47)$$

A incerteza combinada da aceleração média deve então considerar as componentes de incerteza calculadas para cada $\alpha_{(j)}$ e para $u_{R\bar{\alpha}(j)}$, conforme Equação 48.

$$u_{c_{\bar{\alpha}(j)}} = \sqrt{(u_{\alpha(j)})^2 + (u_{R\bar{\alpha}(j)})^2} \quad (48)$$

O próximo capítulo trata da incerteza do momento de inércia de massa, que deverá ser combinada com $u_{c_{\bar{a}}(j)}$ e então compor a incerteza do torque inercial de referência.

4.4.1.6 Incerteza de medição para o momento de inércia de massa

As contribuições para a incerteza de medição dos discos inerciais constituem valores constantes em todas as curvas em que sejam utilizados. É portanto um parâmetro que não depende das condições temporais dos acionamentos.

É sempre importante notar que os valores inerciais dos componentes iniciais do eixo, ou seja, dos componentes constantes no eixo durante a variação, não são considerados para a incerteza de medição pois são sistemáticos e debitados do valor nominal de torque medido com estes componentes e os corpos de referência.

Como já foi explicado no capítulo 4.2.1, os discos inerciais tem geometria simples, composta basicamente de um diâmetro externo, um diâmetro interno e as espessuras, que podem variar conforme as características pretendidas do disco.

A sua modelagem inclui as variáveis dimensionais e de massa da peça de referência, como mostrado na Equação 49.

$$\theta_d = \frac{M_d \cdot (D_e^2 + D_i^2)}{8} \quad (49)$$

Incerteza de medição da grandeza massa (u_{M_d})

A grandeza massa de pesos padrão ou outro artefato pode ser calibrada com o nível de exatidão e qualidade que se desejar⁹⁸. Porém, deve-se diferenciar essas peças conforme características de uso e manutenção das mesmas. Os discos de inércia por exemplo trabalham sob condições ambientais pouco controladas em temperatura e umidade, além de ter uma manipulação grosseira ao serem acoplados e desacoplados dos eixos.

Em consulta ao site da RBC/Inmetro⁸, no campo de laboratórios acreditados para a calibração da grandeza massa, os serviços são diferenciados principalmente em "calibração de pesos padrão" e "medição de massa de peças diversas". Por isso, é mais adequado que os discos sejam então classificados como peças diversas em relação aos pesos-padrão.

A massa é calibrada conforme a precisão que se deseja e a incerteza padrão U_{Md} vem do seu certificado. No caso dos discos utilizados nos testes, não foi possível a realização das calibrações e os valores de massa, que foram determinados por balanças calibradas, puderam ser utilizados como uma referência nominal e a incerteza sendo determinada a partir do que foi obtido no site da RBC. Nesta consulta foi identificado um valor médio de incerteza de 50 mg para peças com valor nominal entre 0,2 kg e 5 kg. Essas condições de uso e incerteza são correspondentes a uma massa de classe F2 segundo a OIML R111⁹⁸. Por se tratar de informação de terceiros e sem conhecimento do processo de calibração ou estimativa, é considerada uma distribuição mais fraca, ou seja, uma distribuição retangular, conforme Equação 50.

$$u_{Md} = \frac{U_{Md}}{\sqrt{3}} \quad (50)$$

Incerteza de medição dos diâmetros do disco (u_{De} e u_{Di})

A equação 49 do momento de inércia mostra que as componentes dimensionais se resumem aos diâmetros interno e externo do disco, respectivamente D_i e D_e . Um método de calibração adequado para esse tipo de peça é através de máquinas de medição por coordenadas⁹⁹.

A Figura 4.40 mostra o disco inercial D20 sendo calibrado em uma máquina de medir por coordenadas do Laboratório de Metrologia Dimensional do Inmetro (LAMED). Além dos diâmetros, esse sistema permite a medição de outras características do disco como por exemplo as espessuras das paredes, o paralelismo entre faces e a excentricidade dos furos. Esta última pôde ser medida para utilização dos dados no capítulo 4.3.1

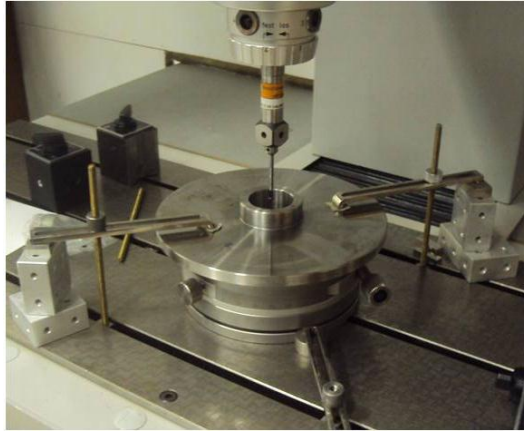


Figura 4.40 – Disco inercial D20 sendo calibrado na MMC do LAMED.

$$u_{De} = \frac{U_{De}}{k} ; u_{Di} = \frac{U_{Di}}{k} \quad (51)$$

Incerteza de medição combinada para o momento de inércia de massa ($u_{\theta c}$):

Abaixo estão os coeficientes de sensibilidade de cada componente de incerteza para a incerteza de medição combinada do momento de inércia de massa $u_{c\theta}$. As incertezas dimensionais são obtidas do mesmo certificado, obtidas do mesmo padrão e, portanto, devem ser combinadas considerando sua correlação.

$$Ci_{\theta_{M_d}} = \frac{\partial \theta}{\partial M_d} = \frac{(D_e^2 + D_i^2)}{8} \quad (52)$$

$$Ci_{\theta_{D_e}} = \frac{\partial \theta}{\partial D_e} = \frac{M_d \cdot D_e}{4} \quad (53)$$

$$Ci_{\theta_{D_i}} = \frac{\partial \theta}{\partial D_i} = \frac{M_d \cdot D_i}{4} \quad (54)$$

$$u_{c_{\theta r}} = \left[\left(\frac{(D_e^2 + D_i^2)}{8} \cdot u_{M_d} \right)^2 + \left(\frac{M_d \cdot D_e}{4} \cdot u_{D_e} \right)^2 + \left(\frac{M_d \cdot D_i}{4} \cdot u_{D_i} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{M_d^2 \cdot D_e \cdot D_i}{16} \cdot u_{D_e} \cdot u_{D_i} \right) \right]^{1/2} \quad (55)$$

4.4.1.7 Incerteza de medição combinada do erro de medição

A Equação 56 calcula a incerteza de medição combinada para o erro de medição.

$$u_{c_E(j)} = \sqrt{(u_{c_{tl}(j)})^2 + (\theta_d \cdot u_{c_{\bar{\alpha}}(j)})^2 + (\bar{\alpha}_{(j)} \cdot u_{c_{\theta r}})^2} \quad (56)$$

O próximo passo então é a determinação do coeficiente de abrangência (k) para estimativa da incerteza de medição expandida do erro (U_E). Os graus de liberdade efetivos serão calculados de acordo com a Equação 57, que considera no numerador a incerteza combinada do erro de medição das médias e no denominador as contribuições de incerteza padrão obtidas das componentes de repetições.

$$v_{eff(j)} = \frac{u_{c_E(j)}^4}{\frac{u_{T12}^4}{N-1} + \frac{u_{T22}^4}{N_z-1} + \frac{u_{T32}^4}{N-1} + \frac{u_{T42}^4}{N_z-1} + \frac{(\theta_d \cdot u_{R\bar{\alpha}})^4}{N-1}} \quad (57)$$

Onde:

- N Número de curvas de acionamento
- N_z Número de pontos nos patamares de torque de tara

Os graus de liberdade efetivos encontrados e o nível de confiança requerida, geralmente 95%, servirão de dados de entrada na tabela de *t-student* onde é determinado o fator de abrangência.

4.4.1.8 Exemplo para dados experimentais

Como ficou demonstrado até aqui, o método de cálculo da incerteza de medição dos vários componentes do erro de medição dos torques é complexo pois requer a entrada de muitas variáveis e a conjugação de resultados interinos ou parciais até a incerteza combinada final. Neste capítulo serão apresentados resultados da incerteza de medição calculada pelas sequências de equações, baseadas no método de propagação das incertezas do GUM e também uma avaliação através do Método de Monte Carlo⁹⁴.

A demonstração da sequência de resultados experimentais e de algumas discussões ficará restrita ao exemplo com o disco D20. Importante ratificar que o

principal objetivo deste conteúdo é demonstrar um método de apresentação dos parâmetros de incerteza e não uma avaliação minuciosa dos resultados em busca de uma validação ou de uma reprovação dos equipamentos ou dos sistemas utilizados nos testes experimentais das bancadas.

O desenvolvimento dos cálculos utiliza os valores medidos de T_{tb} , T_{tbi} , T_{tz} , T_{tzi} e ω em cada índice j das n curvas de acionamento e os valores de incerteza estabelecidos para as grandezas iniciais e principalmente comuns a todos os pontos como u_{cT} , u_{β} , $u_{\Delta t}$, u_{M_d} , u_{D_e} e u_{D_i} . A Tabela 4.17 mostra esses valores de entrada iniciais de incerteza.

Tabela 4.17 - Grandezas de entrada iniciais.

Símbolo	Valor de entrada	Incerteza	Distribuição
u_{cT}	*	0,05%	Normal
u_{β}	0,017 rad	0,01 rad	Retangular
$u_{\Delta t}$	0,00333 s	$1,73 \cdot 10^{-9}$ s	Retangular
u_{M_d}	4,763 kg	$2,887 \cdot 10^{-5}$ kg	Retangular
u_{D_e}	0,038 m	$6,5 \cdot 10^{-7}$ m	Normal
u_{D_i}	0,200 m	$6,5 \cdot 10^{-7}$ m	Normal

* valor de entrada varia conforme torque medido

Como são muitos dados calculados, torna-se uma tarefa árdua e pouco destacável avaliar os resultados de incerteza e a contribuição das várias grandezas de entrada em cada ponto da curva de acionamento. Uma outra forma de demonstrar os resultados é através de uma sequência de gráficos que retratem os resultados de incerteza dos valores de torque (T_{ir} e T_{tl}).

A Figura 4.41.a mostra a curva de torque de referência (T_{ir}) e a curva com os valores de incerteza expandida em cada índice j . O mesmo para a Figura 4.41.b, com a curva de torque medido (T_{tl}) e seus valores de incerteza expandida.

A combinação destes dados vai gerar a incerteza do erro de medição (E), que também deve ser retratada da mesma forma, porém com o delineamento dos limites dos intervalos de confiança calculados em cada índice da curva de torque (ver Figura 4.42).

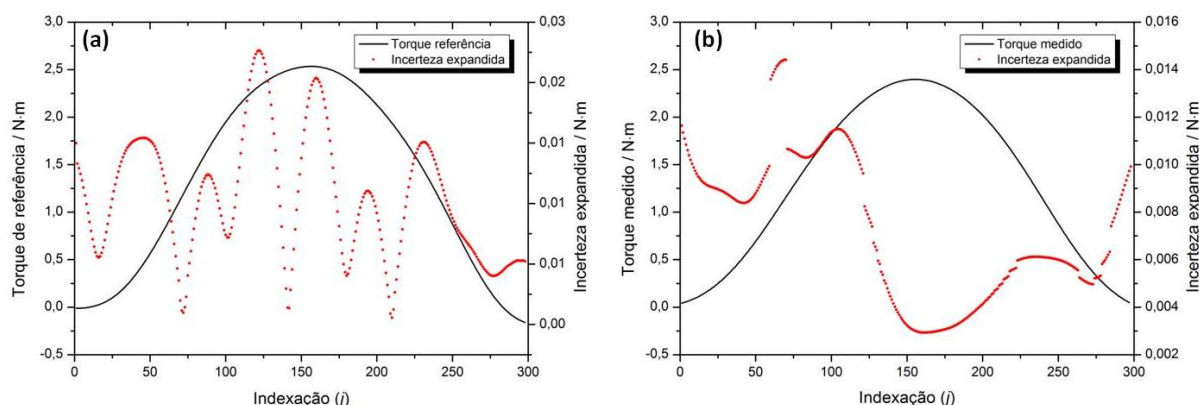


Figura 4.41 – (a) Curva de torque de referência e sua incerteza expandida; (b) curva de torque medido e sua incerteza de medição expandida.

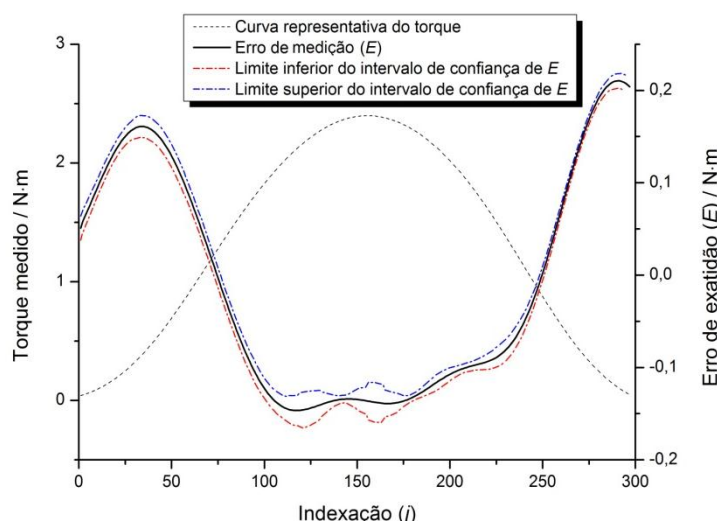


Figura 4.42 – Curva representativa do torque e as curvas de erro de medição envelopado pelas curvas de limite inferior e superior do intervalo de confiança calculado a partir da incerteza expandida de de medição do erro.

É possível também realizar o dimensionamento da participação de cada componente de incerteza no conjunto final combinado. Esta proporcionalidade entre as componentes de incerteza, permite ao usuário avaliar quais pontos podem ser aperfeiçoados no processo de medição.

A Figura 4.43 é um exemplo dessa abordagem, onde estão apresentadas as curvas dos torques médios e as contribuições proporcionais de incerteza, onde as grandezas com identificação iniciando por uT_{XX} significam aquelas contribuições de T_{tl} (ver capítulo 4.4.1.1) e u_{c_α} se refere à contribuição de aceleração. As demais grandezas de entrada de T_{ir} não estão apresentadas nesse gráfico pois, neste caso, sua contribuição é muito pequena em relação às demais.

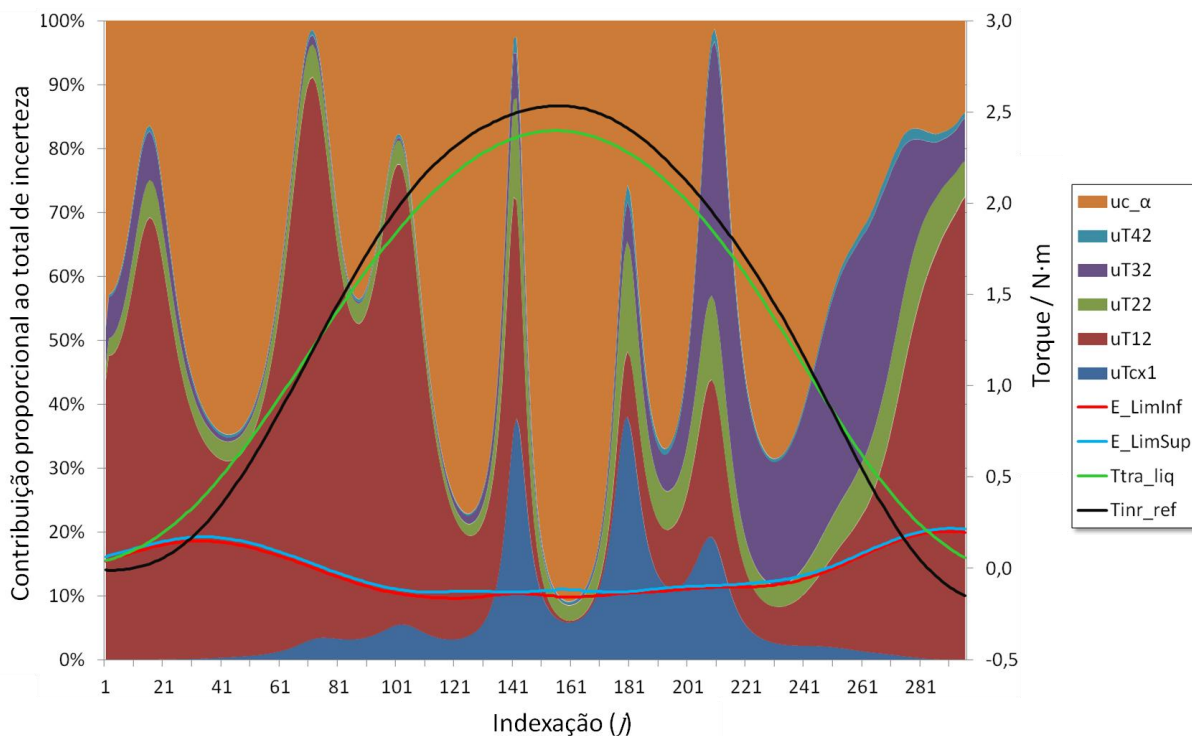


Figura 4.43 – Gráfico com as contribuições parciais de incerteza em toda curva .

O gráfico da Figura 4.43 é uma ferramenta interessante que apresenta um panorama de comportamento da curva sob vários aspectos passíveis de avaliação. É possível por exemplo avaliar uma assimetria entre as componentes em relação eixo central da curva de torque.

Naturalmente, é possível aproximar regiões do gráfico da Figura 4.43 e avaliá-las com maiores detalhes. A Figura 4.44 mostra as contribuições proporcionais de cada componente nas regiões de maior interesse da curva de torque, ou seja, aquelas de maior taxa de variação e a de pico do torque. Nesta avaliação fica bem clara a assimetria das contribuições e a identificação da contribuição negativa da componente referente às correlações entre as incertezas consideradas a partir do certificado de calibração estática do transdutor.

Neste exemplo de análise, mais específico e portanto com mais grandezas mostradas, um dado interessante é a aguda contribuição da componente $u_{T_{cor}}$, sobre os valores para a correlação entre as outras componentes de incerteza de torque provenientes do certificado de calibração estática do transdutor (ver capítulo 4.4.1.1). No desenvolvimento do cálculo essa componente aparece com valor negativo e portanto uma contribuição parcial negativa também é mostrada no gráfico.

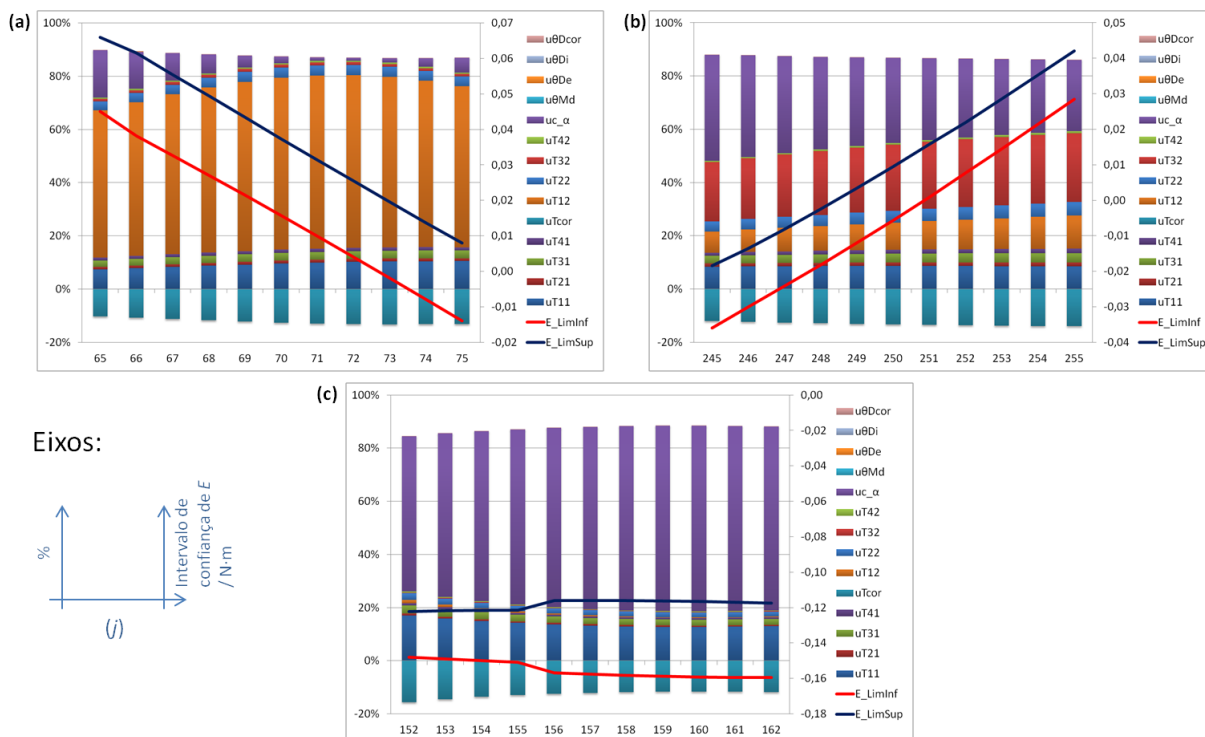


Figura 4.44 – Gráfico com as contribuições parciais de incerteza por regiões: (a) Região de maior taxa de variação positiva do torque; (b) Região de maior taxa de variação negativa do torque e (c) Região de pico de torque.

O mesmo tipo de gráfico pode ser determinado para os componentes de incerteza do momento de inércia de referência, que é uma constante para todos os acionamentos, como mostrado na Figura 4.46. A componente u_{θ_Dcor} se refere à correlação entre as grandezas diâmetro externo e diâmetro interno. que neste caso é positiva.

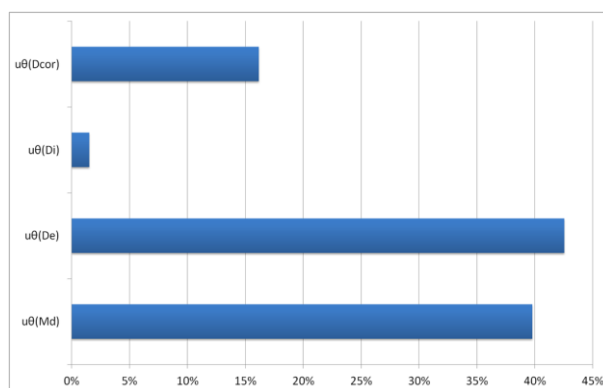


Figura 4.45 – Gráfico com as contribuições parciais de incerteza para o momento de inércia de referência.

Embora os gráficos não mostrem, a componente u_{c_a} é aproximadamente composta na sua totalidade pela fonte de incerteza oriunda da repetibilidade dos valores de aceleração nas três curvas, o que diminui a possibilidade de uma

recuperação ou melhoramento dessa fonte através da substituição do encoder se considerada apenas a busca por uma melhor resolução, como observado no capítulo 4.4.1.5.

4.4.1.9 Comparação Método de Monte Carlo (MMC)

A análise de Monte Carlo é um método que combina as distribuições de probabilidade das grandezas de entrada. A técnica utiliza a geração de números aleatórios para simular os valores de estimativa das entradas e para tal necessita de um bom poderio computacional. Assim como o método da propagação das incertezas, o método de Monte Carlo também tem a sua sequência de passos:

- 1) modelagem do mensurando;
- 2) elaboração do diagrama causa-efeito;
- 3) estimativas das incertezas das fontes de entrada;
- 4) identificação da funções densidade de probabilidade;
- 5) seleção do número total de interações computacionais
- 8) estimativa das incertezas combinadas padrão e expandida.

A montagem de planilhas de cálculo permite uma maior versatilidade na visualização e interpretação dos dados da calibração como um todo. No entanto o processo de desenvolvimento das células de cálculo, da implementação das relações entre essas células e a concatenação final dos resultados deve passar por algum tipo de validação.

No Método de Monte Carlo entra-se com o modelo principal, que segue a equação do modelo metrológico estabelecida para o fenômeno, com alguns ajustes, e os valores de incerteza de cada componente desse modelo. Este método serve de parâmetro à validação das planilhas de cálculo porém só podem ser aplicados a um ponto por vez.

O software utilizado foi o GUM Workbench (Education Version, versão 2.4.1.384) que calcula as incertezas pelos métodos do GUM e de MMC. Os pontos avaliados foram aqueles destacados nas condições de maiores taxas de variação do torque e de pico da grandeza. O modelo em MMC foi estabelecido de forma a apresentar parcialmente os resultados de T_{ir} e T_{tl} antes de combiná-los.

Foram estimadas as incertezas de medição na planilha de cálculo pelo método GUM e no software por ambos os métodos, GUM e MMC. Os resultados atingidos pelos três meios mostraram uma excelente concordância com exceção da incerteza expandida, quando na planilha o método do GUM é aplicado integralmente para cada resultado parcial e também no resultado final, no software o coeficiente de abrangência k é sempre igual a 2. Observa-se na Figura 4.41.b alguns saltos na curva de incerteza expandida, que correspondem exatamente às mudanças nos valores de k entre os pontos.

4.4.2 Método da comparação indireta (curva de ajuste linear)

A aplicação de curvas de ajuste objetiva obter uma relação entre os dados medidos no transdutor e aqueles medidos no sistema de referência através de uma equação. O princípio físico aplicado institui que a relação entre o torque medido e a aceleração medida deve ser linear, governada por um coeficiente angular equivalente ao momento de inércia de massa do eixo rotacional. Desta afirmativa desenvolve-se o estudo para a aplicação da metodologia de cálculo da incerteza de medição de coeficientes angulares em curvas de ajuste obtidas pelo método dos mínimos quadrados, conforme descreveu o capítulo 4.1.5.

A abordagem mais apropriada do GUM deve ser aquela que trata da incerteza de curvas de ajustes, ou seja, a incerteza dos parâmetros que compõem a equação da curva (item 4.2.5 de⁵). Através do método dos mínimos quadrados calculam-se os coeficientes da curva de ajuste e a avaliação da incerteza de medição incorre sobre estes coeficientes. O GUM apresenta então uma aplicação do método dos mínimos quadrados para o cálculo dos coeficientes (intercepto e inclinação) de uma curva de calibração linear (item H.3 de⁵). Antes de entrar no desenvolvimento, o modelo do mensurando a ser utilizado é aquele apresentado na Equação 58 e o gráfico de causa e efeito para as grandezas de entrada na incerteza do mensurando é apresentado na Figura 4.46.

$$\theta_{S_DXX} = a_{DXX} - a_{SD} \quad (58)$$

Observa-se que é um diagrama simples, que aborda as dispersões das grandezas medidas e não considera componentes externas ao processo de medição, como incerteza tipo B por exemplo.

O procedimento a seguir é implementado para cada configuração de inércia dos eixos consideradas nos acionamentos. A partir da equação obtida do ajuste, podem ser calculados valores de $T_{aju(i)}$ para os vários valores de aceleração α no período do acionamento e selecionados sobre os valores de corte definidos para T_{tb} . Pode-se realocar os pares relacionados de torque e aceleração acima do torque de corte com uma nova indexação n_{tc} , que sequencia somente aqueles pares selecionados num total de N_{tc} pares.

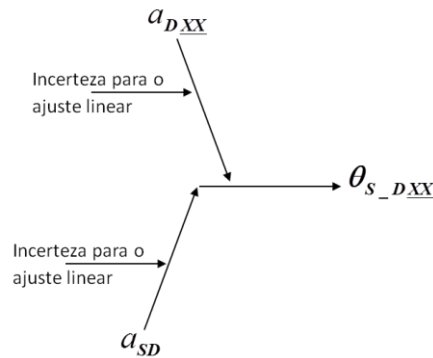


Figura 4.46 – Diagrama causa efeito para as principais fontes de contribuição na estimativa da incerteza de medição do mensurando θ_{S_DXX} .

$$T_{aju(n_{tc})} = a \cdot \alpha_{ref(n_{tc})} + b \quad (59)$$

Importante novamente ressaltar que o coeficiente de intercepção b não será considerado para a avaliação e que, diferentemente das curvas de interpolação utilizadas nas calibrações estáticas para por exemplo relacionar grandezas mecânicas com grandezas elétricas, esta curva não deve ser expressa no certificado de forma a servir como uma peça de caracterização da calibração. Seu uso é interno ao processo de calibração e as informações extraídas dela dão origem a outros parâmetros que prestarão a essa caracterização.

A sequência de cálculo para obtenção da incerteza padrão u_a do coeficiente de inclinação da reta de ajuste está adaptada da sequência mostrada em⁹⁵ conforme Equações de 60 até 64 apresentadas abaixo.

$$s^2 = \frac{\sum_{n_{tc}=1}^{N_{tc}} [T_{aju(n_{tc})} - T_{tb(n_{tc})}]^2}{N_{tc} - 2} \quad (60)$$

$$s' = \sum_{n_{tc}=1}^{N_{tc}} \alpha_{(n_{tc})}^2 \quad (61)$$

$$s'' = \sum_{n_{tc}=1}^{N_{tc}} \alpha_{(n_{tc})} \quad (62)$$

$$\delta = N_{tc} \cdot s' - (s'')^2 \quad (63)$$

$$u_a = \sqrt{N_{tc} \cdot \left(\frac{s^2}{\delta}\right)} \quad (64)$$

Deve-se considerar essa metodologia de cálculo para u_a em ambas as condições de inércia, gerando portanto o par de incertezas u_{a_SD} e u_{a_DXX} , para os casos sem disco e com disco respectivamente. A incerteza combinada dessas duas componentes será portanto representante da incerteza de medição do momento de inércia de massa calculado θ_{s_DXX} será dada pela Equação 65.

$$u_{\theta_{s_DXX}} = \sqrt{(u_{a_DXX})^2 + (u_{a_SD})^2} \quad (65)$$

Avançando na comparação entre os momentos de inércia calculado e de referência, pode-se determinar o erro E_θ pela Equação 66 a seguir.

$$E_\theta = \theta_s - \theta_r \quad (66)$$

Logo, a incerteza desse erro ($u_{E\theta}$) será a combinação entre a incerteza do momento de inércia de massa calculado e incerteza do momento de inércia de massa de referência, cujo método de determinação já foi exposto no capítulo 4.4.1.6 que é calculado pela Equação 67.

$$u_{E\theta} = \sqrt{(u_{\theta_{s_DXX}})^2 + (u_{c\theta_{ref}})^2} \quad (67)$$

O fator de abrangência k para cálculo da incerteza expandida de medição $U_{E\theta}$ nesse caso será considerado como 2 pois o número de pares considerados de T_{tb} e α para as incertezas padrão dos respectivos coeficientes angulares é muito alto.

4.4.2.1 Exemplo numérico

A incerteza de medição, assim como os demais resultados obtidos do método da comparação indireta, deve ser apresentada sob a identificação das condições em que os parâmetros foram calculados. Isto é, o ponto de corte dos dados de torque deve estar bem identificado assim como o número de curvas de carregamento que foram aplicadas.

Uma forma de apresentação e análise é através de tabelas que identifiquem essas variáveis. A Tabela 4.18 mostra as variáveis calculadas a partir das incertezas dos coeficientes angulares e da incerteza do momento de inércia de massa de referência.

Tabela 4.18 - Valores de incerteza calculados para diferentes configurações de inércia D_{XX} e diferentes pontos de corte para seleção de dados para a reta de ajuste (valores em $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ exceto onde indicado).

	D20		D40	
θ_{ref}	0,02489		0,04960	
$u_{\theta_{ref}}$	$2,38 \cdot 10^{-07}$		$3,9 \cdot 10^{-07}$	
Torque de corte*	2,0 N·m	1,5 N·m	3,0 N·m	4,0 N·m
θ_s	0,023555	0,022754	0,045120	0,046500
$u_{a_{D20}}$	$8,53 \cdot 10^{-05}$	$6,82 \cdot 10^{-05}$	$5,31 \cdot 10^{-05}$	$1,02 \cdot 10^{-04}$
$u_{a_{SD}}$	$4,33 \cdot 10^{-05}$		$4,33 \cdot 10^{-05}$	
u_{θ_s}	$9,56 \cdot 10^{-05}$	$8,08 \cdot 10^{-05}$	$6,85 \cdot 10^{-05}$	$1,10 \cdot 10^{-04}$
	0,41%	0,36%	0,15%	0,24%
E_{θ}	-0,0013353	-0,0021362	-0,0044855	-0,0031062
	-5,4%	-8,6%	-9,0%	-6,3%
$u_{E_{\theta}}$	$9,56 \cdot 10^{-05}$	$8,08 \cdot 10^{-05}$	$6,85 \cdot 10^{-05}$	$1,1 \cdot 10^{-04}$
$U_{E_{\theta}}$	0,0001913	0,0001616	0,000137	0,0002207
	14%	8%	3%	7%

Embora o principal parâmetro a ser identificado seja $U_{E_{\theta}}$, um resultado parcial interessante é a incerteza u_{θ_s} , ou seja, um parâmetro que se refere ao momento de inércia de massa calculado ainda sem uma comparação ao momento de inércia de referência.

Aplicando um simples algoritmo que varia os pontos de corte de $T_{tb(SD)}$ e $T_{tb(DXX)}$ e realiza os cálculos de erro e incerteza, é possível observar uma malha de

resultados e seus comportamentos conforme combinação desses dois parâmetros. A Figura 4.47 mostra os gráficos para as variações do erro e da incerteza de medição em resposta às variações de ambos pontos de corte.

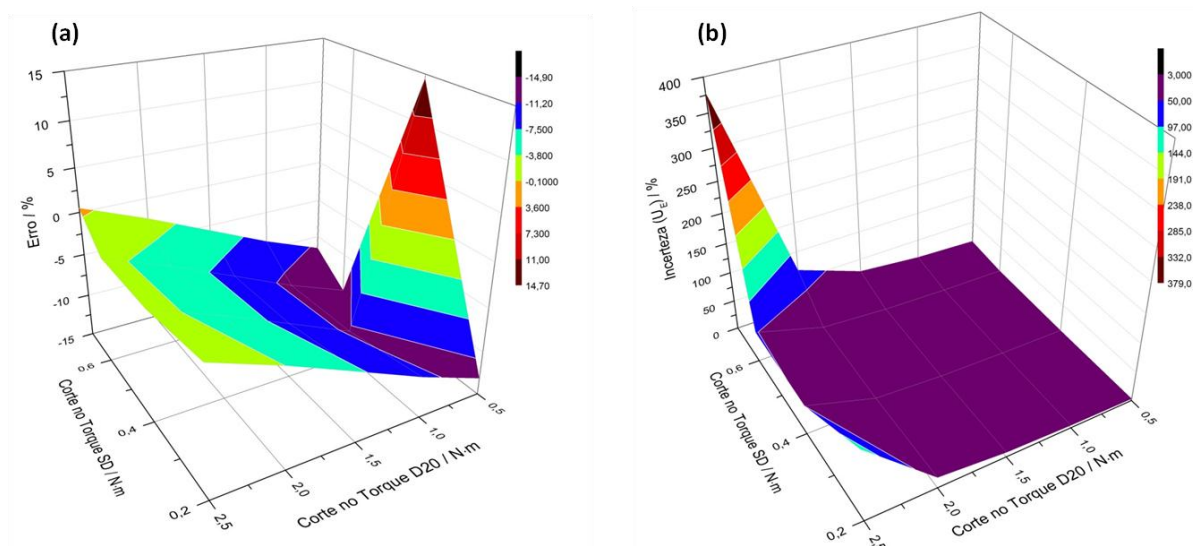


Figura 4.47 – Diagrama de (a) erro e (b) incerteza para os diferentes torques de corte aplicados nas massas de dados de SD e D20 para cálculos das curvas de ajuste.

Essa análise é interessante pois identifica a relação custo benefício em se aumentar os níveis de ponto de corte em busca de um melhor erro de medição. Na Figura 4.47.a, o par de pontos de corte 0,7 N·m e 2,5 N·m, para os torques $T_{tb(SD)}$ e $T_{tb(D20)}$ respectivamente, gera um erro E_θ menor, mas também um crescimento acentuado na incerteza de medição $U_{E\theta}$.

4.4.3 Considerações sobre a incerteza de medição

Este capítulo sobre incerteza de medição procurou mostrar as grandezas de entrada principais no diagrama de construção dos mensurandos. As abordagens teóricas e práticas para a inclusão dessas contribuições tem principalmente o caráter demonstrativo de um procedimento a ser adotado pelo procedimento de calibração. A avaliação dos resultados experimentais pode portanto alcançar tanto interpretações sobre suas ordens de grandeza, que comprovam uma qualidade aos dados de referência, como devem também orientar a respeito de como obtê-los a partir de um procedimento escrito.

Não foi possível materializar a rastreabilidade para todos os componentes influentes das grandezas, mas ficou demonstrado e discutido os caminhos a serem adotados para se conseguir as respectivas calibrações, contando inclusive com breves comparações entre sistemas e métodos de padronização acessíveis no mercado.

Da mesma forma que os erros de medição, as incertezas de medição devem ser reportadas atreladas às condições em que os acionamentos e as medições aconteceram. Por se tratar de uma massa de muitos dados, a forma gráfica de apresentação desse parâmetro se mostrou muito eficiente pois é de fácil interpretação por parte do operador do equipamento.

A breve comparação entre o tradicional método de propagação de incertezas e o Método de Monte Carlo mostrou uma excelente convergência dos resultados obtidos por ambos. No entanto, por se tratar de uma curva de torque onde são avaliados diferentes pontos e regiões de pontos simultaneamente, o método MMC pode ser pouco prático. Se a demanda da calibração foca apenas alguns pontos chaves da curva, daí o MMC passa a ter certa vantagem sobre o método do GUM.

O Apêndice D apresenta as tabelas com os resultados a serem comparados entre os métodos GUM e MMC.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Ao longo do texto foram apresentadas conclusões parciais e comentários à medida que os resultados eram obtidos, como nos conteúdos dos capítulos 4.1.6, 4.2.4 e 4.4.3. Essas conclusões são dirigidas à interpretação dos dados para demonstração da viabilidade da aplicação do método proposto à calibração dinâmica de transdutores de torque.

A seguir, algumas conclusões, observações e discussões complementares são resgatadas e apresentadas de modo a concatenar os resultados alcançados em toda abrangência da pesquisa no que tange a formatar a proposta de um novo método de calibração, candidato à padronização dinâmica da grandeza torque.

5.1 Destaques para os achados principais

No início do Capítulo 3 são postas algumas questões acerca dos objetivos da proposta desta pesquisa. Os parâmetros dinâmicos que foram avaliados nos transdutores de torque puderam ser identificados. Foram relatadas as informações a respeito dos parâmetros ajustados do acionamento.

O princípio físico proposto se mostrou válido na medida em que pôde ser comprovado pelas medições simultâneas de dois sensores para as grandezas distintas: a aceleração via *encoder* e o torque pelo transdutor.

No método comparativo direto, o erro de medição entre o valor de torque medido e o valor de torque de referência teve sua dependência temporal evidenciada, podendo ser determinado para cada ponto indexado da curva de torque. Foi realizado o mapeamento de pontos específicos da curva, como as regiões de maior taxa de variação da grandeza e a região de pico, a comparação

entre os erros de medição de pontos com determinada simetria localizados em uma mesma curva e a comparação da resposta de um mesmo ponto, ou faixa de torque sob condições de carregamento dinâmico diferentes. Uma matriz de resultados que relaciona essas variáveis características do acionamentos pôde ser realizada e indicou uma forma promissora de avaliar o instrumento, embora restrita a somente um ponto por matriz.

No método comparativo indireto, o erro de medição entre os valores de momento de inércia de massa calculado do ajuste linear dos dados e o momento de inércia de massa de referência foi um parâmetro com boa correspondência à avaliação de histerese e de desvio de linearidade dos dados em relação ao princípio físico.

Em ambos os métodos, direto e indireto, cada conjunto de valores de erro é relacionado aos parâmetros ajustados e alcançados no acionamento, como tempo de aceleração dos motores, intervalos de velocidade, perfis de aceleração e momento de inércia de massa de referência.

O perfil de carregamento proposto mostrou-se capaz de aplicar boas taxas de variação da aceleração e, por capacidade do motor, transformá-las em altas taxas de variação da grandeza torque garantindo as características dinâmicas dos regimes.

Valores de taxa de variação do torque de até $15 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ puderam ser alcançados experimentalmente e, a partir das relações mostradas entre os limites do motor e do inversor de frequência, ficou demonstrado a viabilidade de alcance de outras taxas com a utilização de outros conjuntos acionadores e discos de inércia.

5.2 Destaques para a metodologia de medição

A metodologia de medição desenvolvida demonstrou ser eficiente para lidar com os valores de torque e de aceleração nas diferentes situações das curvas e das configurações de inércia. O método manual de sincronização das curvas se mostrou muito demorado. Porém, com a manipulação dos dados de torque e aceleração realizada em softwares de interface simples, tornando-o mais ágil, percebeu-se que este método mantém as referências entre as colunas de dados, o que vem a auxiliar

o operador e os resultados de baixo desvio padrão obtidos mostram a eficácia do método. Dados muito espaçados, ou seja, amostrados com baixa frequência trazem maiores dificuldades ao operador, pois isto diminui as resoluções dos passos possíveis na sincronização.

A prática mostrou que um trecho dessas curvas deve ser selecionado para funcionar como região válida para trabalho, enquanto outras devem ser descartadas já que não apresentam o mínimo de estabilidade nas leituras. Essa necessidade funciona como uma restrição ao perfil de carregamento pois as extremidades da curva, que correspondem à transição do torque positivo para o torque negativo, ou vice versa, são muito instáveis.

A diferença de estabilidade entre a região de pico e as regiões mais próximas às extremidades da curva pôde ser quantificada. Esse resultado ratificou a expectativa de maior estabilidade na região de pico, onde a taxa de variação da aceleração é nula.

Os testes realizados contaram com um número de curvas de acionamento entre 3 e 5. No entanto, na análise dos dados ficou claro que, em alguns acionamentos, algumas dessas curvas apresentavam perturbações que prejudicaram a análise de estabilidade das mesmas. É interessante portanto que o procedimento de calibração adote essa hipótese e oriente, de forma normativa, que o operador faça um mínimo de carregamentos superior a esses testados.

Num futuro, deve-se ter uma discussão a respeito de quantas combinações de inércia e aceleração serão suficientes para se criar uma massa de dados que, quando analisada, sejam capazes de caracterizar um transdutor com boa parte de sua faixa de medição acionada. A pesquisa atual não responde essa pergunta pois não tinha este objetivo e os experimentos estavam restritos aos equipamentos disponíveis.

Não foi possível avaliar a região de torque nulo posterior ao carregamento, proposta no 'item E' da Figura 3.2, pois a curva de aceleração mostrou uma faixa de oscilação, característica da estabilização do controle, que gera uma oscilação também do torque em torno do torque nulo. Já a porção anterior à curva, o denominado patamar de tara, pôde ter a sua estabilidade avaliada, o que, agregada com uma variação controlada das características de acionamento, funciona como um parâmetro de avaliação do alinhamento do eixo de medição e também das características ajustadas no sistema DAQ. Ajustes incompatíveis ou insuficientes de

taxa de amostragem e filtros digitais mostraram exercer forte influência nos resultados das avaliações. Um procedimento específico de avaliação prévia desses parâmetros antecedendo a sequência de calibração, deve ser abordado no procedimento principal de calibração.

O fluxograma da Figura 3.9 mostra uma sequência de operação do sistema de calibração proposta inicialmente. Com o avanço da pesquisa e o surgimento dos resultados, essa sequência precisou ser revisada e incrementada nos diversos níveis das atividades e ações ali inicialmente propostas. O Apêndice E apresenta a nova proposta de sequência de blocos para a operação do sistema, a caracterização metrológica do sistema, a calibração do artefato e até a parte do tratamento de dados. Estes parâmetros em si já oferecem uma contribuição interessante para a padronização do método de calibração dinâmica de transdutores de torque.

5.3 Destaques para os componentes

Embora o foco principal da pesquisa tenha sido o desenvolvimento de uma proposta de método para a calibração dinâmica de transdutores de torque, os equipamentos utilizados para esse desenvolvimento puderam também ser avaliados sob a perspectiva da sua futura utilização em outros sistemas mecânicos a serem instalados para a aplicação do método.

Os equipamentos utilizados nas bancadas experimentais apresentaram ótimos resultados, principalmente no que se refere à controlabilidade e à capacidade de alcance em torque. Será perfeitamente produtivo que nas futuras instalações que venham a ser projetadas, sejam para a reprodução ou o aprofundamento dos estudos do método aqui proposto, e que esses tipos/modelos de equipamentos acionadores possam ser novamente utilizados.

O conjunto formado por um motor elétrico de indução e um inversor de frequência, selecionados para a configuração básica do sistema acionador, se mostrou capaz de aplicar e reproduzir as curvas de aceleração requeridas no método e com bons valores nominais de aceleração e taxa de variação da aceleração que puderam ser avaliados sob diferentes condições de acionamento e carga.

O conjunto acionador pôde ser avaliado também quanto à sua especificação teórica dos tempos mínimos de aceleração e torque máximo de aceleração, parâmetros fundamentais para a determinação das capacidades dinâmicas do sistema de calibração proposto. Resultados experimentais para ambos parâmetros demonstraram uma incoerência em relação aos calculados teoricamente. No entanto, essa incompatibilidade entre a teoria e a prática favorece a proposta de acionamentos utilizada nos regimes de calibração propostos pois os conjuntos se mostraram capazes de suportar torques de aceleração maiores que aqueles determinados em sua especificação sem danos aos componentes quando aplicados em curtos tempos de aceleração.

As curvas de controle de velocidade puderam ser determinadas em detalhes suficientes para sua interpretação, quanto à reprodutibilidade e seleção do trecho semelhante ao proposto para o regime de acionamento no sistema de calibração.

Não foi possível avaliar as respostas do sistema em regimes cuja desaceleração atingisse os mesmos níveis nominais e máximos da aceleração pois, nessa condição, o motor passaria a trabalhar também como um gerador de tensão, que iria sobrecarregar o inversor de frequência. No entanto algumas curvas com baixos valores de desaceleração puderam ser aplicadas de maneira que, mesmo numa avaliação qualitativa, foi possível observar a manutenção do princípio físico também nesses regimes.

Ficou demonstrada a influência da faixa de velocidade nos valores finais de pico de aceleração para os acionamentos com o mesmo intervalo de velocidade e o mesmo tempo de aceleração, o que é uma característica dos motores elétricos AC.

Importante destacar que, as duas regiões com as maiores taxas de variação do torque, crescente e decrescente, apresentaram resultados de estabilidade que podem ser selecionáveis para essa região restritiva dos dados a ser considerada na avaliação.

Durante o desenvolvimento da tese, foram verificados valores de torques de atrito nos mancais de rolamento muito acima daqueles calculados, por equações obtidas na especificação desses componentes, para o modelo de rolamento selecionado para a bancada #2. Embora a prática tenha demonstrado um comportamento sistemático desse torque parasita, sugerindo que pudesse ser subtraído do valor de torque inicial, não foi possível alcançar resultados mais

minuciosos que garantissem a inclusão desse procedimento específico no procedimento mais amplo da calibração.

Os acoplamentos hidráulicos e flexíveis puderam ser utilizados nas diferentes configurações de inércia propostas no estudo. A confiabilidade metrológica e a facilidade de manuseio credenciam esses componentes para serem utilizados em pesquisas futuras.

A disposição dos elementos no eixo de medição, como na bancada #2, se mostrou eficaz para ser reproduzido em instalações futuras. No entanto cabem algumas observações com o objetivo de melhorar essas instalações. Ainda nessa linha de discussão sobre a montagem, um resultado prático foi o desenvolvimento de um projeto de bancada para realização de testes futuros. O Apêndice G apresenta um desenho dessa estrutura, onde podem ser identificados elementos de montagem diferenciadores e apuradores daqueles utilizados nas bancadas #1 e #2 dos testes.

5.4 Trabalhos futuros

Alguns pontos para trabalhos futuros ficaram bastante evidentes a partir dos resultados e das conclusões apresentadas no decorrer do texto. A recapitulação destes alvos e a formação de outros é importante para pontuar a pesquisa em um cenário promissor na área de metrologia de torque dinâmico.

- Testar as respostas do sistema para regimes de frenagem - necessita de um resistor de frenagem a ser acoplado ao circuito do inversor de forma a permitir essas cargas extras de frenagem;
- Desenvolver um sistema e uma metodologia para a calibração dinâmica de *encoders*, avaliando o possível ganho com a substituição do encoder do transdutor por um transdutor de referência de melhor qualidade;
- Testar a metodologia de calibração em outros patamares de torque, variando os discos;
- Investigar o problema de sincronização no caso de utilização de sistemas DAQ diferentes para leituras do encoder de referência e do transdutor em calibração;

- Investigar a influência do atrito dos mancais quando em regimes dinâmicos e atuar no intuito de minimizar esse atrito, seja com novos componentes de modelos diferentes daquele usado na prática, seja com tipos diferentes de mancais, como por exemplo a utilização de mancais aeroestáticos que já são utilizados em alguns padrões primários estático por gerarem torque de atrito praticamente nulo⁶;
- Avaliar a necessidade de projetar um sistema para a verificação/calibração dos valores de momento de inércia de massa dos discos e de outros componentes mecânicos;
- Aperfeiçoar os projetos das bancadas de teste, como sugerido nos desenhos esquemáticos do Apêndice G.
- A realização de uma comparação interlaboratorial com outros INMs, principalmente o PTB, que já vem trabalhando mais praticamente no tema, é uma forma interessante de iniciação dessa inclusão internacional proposta ao conjunto.

REFERÊNCIAS

1. Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). [Online] [Citado em: 22 de 10 de 2015.] www.hbm.com.
2. Shanghai Bairoe Test Instrument Co., Ltd. NZA series Multifunction Fastener Analysis System. [Online] [Citado em: 22 de 10 de 2015.] <http://www.bairoe.cn/news/nza-series-multifunction-fastener-analysis-system-3435.html>.
3. FUTEK Advanced Sensor Technology, Inc. Nut Runner Force/Torque. [Online] [Citado em: 22 de 10 de 2015.] <http://www.futek.com/application/load-cell/Nut-Runner-Force-Measurement#.Vils2isrh14>.
4. Cal Lab - The International Journal of Metrology. Metrology 101: Basic Torque Calibration - Cal Lab Magazine. [Online] 2014. [Citado em: 12 de Março de 2015.] <http://www.callabmag.com/?p=4995>.
5. National Institute of Standards and Technology (NIST). Uniform Realization of the Unit of Torque in the US. [Online] Fevereiro de 2008. [Citado em: 12 de Março de 2015.] <http://www.nist.gov/pml/div684/grp07/urut.cfm>.
6. United Kingdom Accreditation Service (UKAS). UKAS Calibration. [Online] [Citado em: 12 de Março de 2015.] www.ukas.org/calibration/multiplesearchresult.asp.
7. Estudo Sobre a Implantação da Padronização Primária de Torque no Brasil. [Dissertação de Mestrado]. Niterói : Universidade Federal Fluminense (UFF), 2006.
8. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Rede Brasileira de Calibração - RBC. [Online] [Citado em: 12 de Março de 2015.] <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/>.
9. Bureau International des Poids et Mesures. Calibration and Measurement Capabilities - CMCs. *The BIPM key comparison database*. [Online] [Citado em: 12 de Março de 2015.] <http://kcdb.bipm.org/appendixC/>.
10. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem. [Online] <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/eficiencia.asp>.

11. Presidência da República - Casa Civil - Subchefia para Assuntos Jurídicos. DECRETO Nº 4.508, DE 11 DE DEZEMBRO DE 2002. 11 de Dezembro de 2002.
12. International Organization for Standardization (ISO). ISO 1352:2011 - .
13. Projeto EMRP. [Online] <http://www.ptb.de/emrp/ind09.html>.
14. Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). 7th workshop on Analysis of Dynamic Measurements. [Online] 2012. [Citado em: 12 de Março de 2015.] <http://www.french-metrology.com/workshop/dynamic-measurement-workshop.asp>.
15. Lorenz Messtechnik GmbH. Evolution and Future of Torque Measurement Technology. [Online] [Cited: 12 Março 2015.] http://www.lorenz-messtechnik.de/english/company/torque_measurement_technology.php.
16. NIRS application in evaluating threaded-fastener driving assembly tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2, Março de 2010, Vol. 40, pp. 146-152.
17. Atlas Copco Tools and Assembly Systems. Torque measurements - views from an assembly power tool manufacturer. [Online]
18. Braking responses of inertia/load by using an electro-rheological (ER) brake. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 08 de Dezembro de 2004.
19. Stanley Assembly Technologies. Stanley Assembly - Fastening Technology - Torque Control in QPS Fastening system. [Online] 2001. [Citado em: 12 de Março de 2015.] www.stanleyassembly.com.
20. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). (PTB): 1.22 Realization of Torque. [Online] PTB. <http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt1/fb-12/ag-122.html>.
21. International Measurement Confederation (IMEKO). Imeko - TC3 Homepage. [Online] <http://www.imeko.org/index.php/tc3-homepage>.
22. International Organization for Standardization (ISO). ISO - Technical committees - ISO/TC 164/SC 5 - Fatigue testing. [Online] http://www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees/other_bodies/iso_technical_committee.htm?commid=53562.
23. *Avaliação reológica de elastômeros e suas composições*. 4, São Carlos : s.n., 2004, Polímeros, Vol. 14.

24. *Rheometers: Which Type Is Right for You?* Lilli , Manolis Sherman. 2004, *Plastics Technology*.
25. Compact and lightweight optical torque sensor for robots with increased range. *Measurement*. 2012.
26. Development of a touch probe based on five-dimensional force/torque transducer for coordinate measuring machine (CMM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2012.
27. Development of a Drilling Process with Torque Stabilization. *Journal of Manufacturing Systems*.
28. L. Ken , Lauderbaugh Saunders e Nader, Vahdati. Measurement of a large impulse torque including measurand reconstruction. *ISA Transactions*. 38, 1999.
29. International Organization for Standardization (ISO). ISO 5393 - Rotary tools for threaded fasteners - Performance test method. 1994.
30. Handle displacement and operator responses to pneumatic nutrunner torque buildup. *Applied Ergonomics*. 37, 2006.
31. Experimental evaluation of wind turbines maximum power point tracking controllers. *Energy Conversion and Management*. 47, 2006.
32. In-line dynamic torque measurement in twin-screw extrusion process. *Chemical Engineering Journal - Measurement*. 2007.
33. Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007.
34. *Traceability of Rotating Torque Transducers Calibrated Under Non-Rotating Operating Conditions*. Andrae, Jurge, Nold, W. e Wegener, Georg. s.l. : Imeko, 2003. Proceedings from XVII Imeko World Congress Metrology in the 3rd Millennium.
35. Schicker, R. e Wegener, Georg. *Measuring torque correctly*. s.l. : Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2002.
36. Schicker, R. e Kuhn, S. High Precision Torque Measurement Systems in Engine Test Benches. [Online] www.hbm.de.
37. Martyr, A. J. e Plint, M. A. *Engine Testing*. Third Edition 2007. s.l. : Elsevier Ltd., 1995.
38. A Method of Calibration of Clutch Torque Transfer Feature Based on AMT Launch Control. *Procedia Engineering*. 2011.

39. Braking responses of inertia/load by using an electro-rheological (ER) brake. *Mechatronics* . 2007.
40. Validation of dynamic torque response of an electrorheological (ER) clutch. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009.
41. Larsson, S e Andersson, I. Self-optimising control of an SI-engine using a torque sensor. *Control Engineering Practice*. 2008.
42. Hazelden, R J. Optical torque sensor for automotive steering systems. *Sensors and Actuators A: Physical*. 1993.
43. Sensor Development Inc. Vehicle Sensors - 90360 Series - wheel torque sensor. [Online] <http://sendev.com/catalog/pdf/90360.pdf>.
44. Admet. Testing Machines. [Online] http://admet.com/torsion_testing_machines.htm.
45. Senstel. Special Torque Transducers. [Online] <http://www.sensstel.co.uk/images/highspeedtorquesensors.pdf>.
46. Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). *Measuring Torque Correctly*. Darmstadt : s.n., 2007.
47. Omega Engineering inc. Shear Strain Gages, Transducer Quality for Shear or Torque Application. [Online] Omega. [Citado em: 20 de Abril de 2015.] www.omega.com/pptst/SGT_Shear_Gages.html.
48. Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. Bridge Circuit and cable Connection of Sensor. [Online] [Citado em: 20 de Abril de 2015.] www.kyowa-ei.com/eng/technical/sensors/bridge_circuit.html.
49. Oliveira, Rafael, Guilherme, Rodrigo e Cabral, Luiz Carlos. Influence of operational parameters on a hand-operated torque standard machine. *Measurement*. 2012, Vol. 45.
50. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). *Final Report on the Torque Key Comparison CCM.T-K1 Measurand Torque: 0 N·m, 500 N·m, 1000 N·m*. 2009.
51. *Intercomparison in Torque-What are Important Criteria?* Peschel, Diedert, et al. 2002. Proceedings of the Joint International Conference IMEKO TC3/TC5/TC20.
52. *Interpretação e Aplicação das Normas NBR-12240 e ISO-6789 na Calibração de Instrumentos de Medição de Torque*. Oliveira, Rafael Soares, Freitas, Luiz Carlos e Cruz, Jorge Antonio. s.l. : SBM, 2003. Metrologia 2003.

53. Freitas, Luiz Carlos. *Um Estudo no Gerenciamento da Implantação da Padronização Primária de Torque*. Universidade Federal Fluminense. 2006. Dissertação de Mestrado.
54. *The torque metrology management in Brazil*. Freitas, Luiz Carlos, et al. 2007. IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference, Cultivating metrological knowledge.
55. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT 12240. 2014.
56. European Association of National Metrology Institutes (EURAMET). *Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices (EURAMET cg-14)*. s.l. : European Association of National Metrology Institutes (EURAMET), 2011.
57. Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 51309 . 2005.
58. British Standards (BS). BS 7882.
59. ASTM. ASTM E 2428. *Norma Técnica*. [Documento].
60. *A COMPARISON OF PURELY STATIC AND CONTINUOUS TORQUE CALIBRATION PROCEDURE*. Nattapon, S. e Tassanai, S. 2014. IMEKO 22nd TC3, 15th TC5 and 3rd TC22 International Conferences.
61. Oliveira, Rafael, Cabral, Luiz e Koch, Claudio. *A COMPARISON BETWEEN ABNT NBR 12240, BS 7882 AND DIN 51309 STANDARDS FOR TORQUE CALIBRATION - IT IS TIME FOR A REVISION IN BRAZILIAN STANDARD*. *Congresso Metrologia 2011*. 2011.
62. Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). HBM - Strain Gages and Accessories. [Online] [Citado em: 01 de 04 de 2015.] <http://www.hbm.com.pl/pdf/s1265.pdf>.
63. Roeske, Dirk. *The New version of the German torque calibration standard DIN 51309:2005 a comparative*. *IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference*. 2007.
64. *The State of the Art and Future Development of Metrology in the Field of Torque Measurement in Germany*. Peschel, Diedert. 1997. Proceedings of the XIVth IMEKO World Congress.
65. *Calibration of Torque Measuring Devices - Step-by-step or Continuous Procedure*. Peschel, Diedert e Brüge, Andreas. 1998. Proceedings of the 16th IMEKO TC3 Conference.
66. *Fast Torque Calibrations Using Continuous Procedures*. Brüge, Andreas. 2002. Proceedings - Imeko TC3 2002.

67. *Uncertainty considerations for the physical quantity torque*. Röske, Dirk. 2006. China industry system - Technical Seminar of Torque Metrology Technology.
68. *NEW PROPOSALS FOR THE DYNAMIC TESTS OF TORQUE TRANSDUCERS*. Oliveira, Rafael, et al. Ilmenau : s.n., 2014. 58th Ilmenau Scientific Colloquium Proceedings.
69. *CREEP MEASUREMENT IN REFERENCE TORQUE CALIBRATION MACHINES*. Brüge, Andreas. 2010. IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences Proceedings.
70. *Mathematical representation of reference torque transducers in partial-range regimes*. Brüge, Andreas. 2007. IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference.
71. *Investigation on transducers for transfer or reference in continuous torque calibration*. Brüge, Andreas e Konya, Rudolf. 2005. Imeko TC3 Proceedings.
72. Brüge, Andreas. Influence of Rotation on Rotary Torque Transducers Calibrated Without Rotation. *Measurement*. 1997.
73. *Measurement and Calibration Using Reference and Transfer Torque Fanges*. Andrae, Jurgen. 2001. Proceedings of the 17th International Conference on Force, Mass, Torque and Pressure Measurements - IMEKO TC3.
74. *Use of Reference Torque Transducers for the On-Site Calibration of Rotating Torque Transducers in Power Test Stands*. Bruns, Thomas e Wegener, Georg. 2002. Proceedings of IMEKO 2002.
75. Wegener, Georg e Andrae, Jurgen. Measurement uncertainty of torque measurements with rotating torque transducers in power test stands. *Measurement*. 2007.
76. Fujii, Y. A proposal for a dynamic-response-evaluation method for torque transducers. *Meas. Sci. Technol*. 1999.
77. *Sinusoidal Torque Calibration: A Design for Traceability in Dynamic Torque Calibration*. Bruns, Thomas. 2003.
78. Wegener, Georg e Bruns, Thomas. Traceability of torque transducers under rotating and dynamic operating conditions. *Measurement*. 2009.
79. *Model Parameter Identification from Measurement Data for Dynamic Torque Calibration*. Klaus, Leonard, et al. 2014.
80. *Dynamic Calibration Methods for Force Transducers*. Fujii, Yusaku. 2006. XVIII IMEKO WORLD CONGRESS .

81. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Development of Methodologies for Dynamic Calibration of Machines for Testing Orthopedic Implants*. 2010. roject through an agreement signed between the FNS and Inmetro specified in the Technical Cooperation n.º 42, 2009-2010.
82. *Dynamic Calibration of a Fatigue Testing Machine on Orthopaedic Implants in Accordance with the ISO 4965-1*. Oliveira, Rafael Soares, et al. 2010. IMEKO 2010 TC3 Conference.
83. CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. CAPES - Bragecrim. [Online] CAPES. [Citado em: 24 de 04 de 2015.] <http://www.capes.gov.br/cooperacao-internacional/alemanha/bragecrim>.
84. RWTH Aachen University - Laboratory for Machine Tools and Production Engineering. Bragecrim. [Online] [Citado em: 24 de 04 de 2015.] <http://www.bragecrim.rwth-aachen.de/>.
85. Guoling, K, Zaimin, Z e Zhuoping, Y. Method of Calibration of Clutch Torque Transfer Feature Based on AMT Launch Control. *Procedia Engineering*. 2011.
86. Wikipedia. Electric motor. [Online] [Citado em: 22 de 06 de 2015.] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor.
87. Appropedia. Comparison of electric motors - Appropedia: The sustainability wiki. [Online] [Citado em: 22 de 06 de 22.] http://www.appropedia.org/Comparison_of_electric_motors.
88. WEG Automação. *CFW11 - Inversor de frequência*. [Catálogo] 2012.
89. Grupo Voges. Motores elétricos trifásicos industriais VTop. [Online]. Caxias do Sul : s.n., 2012.
90. HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. T10F - Torque Flange (data sheet). Darmstadt : HBM.
91. HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. T12 - Torque Flange Data Sheet.
92. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Analysis of dynamic measurements. [Online] [Citado em: 25 de 08 de 2015.] <http://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-842/dynamischmessungen-842.html>.
93. Claudino, Rafael, et al. Estimativa do torque inercial em eixos girantes - uma abordagem metrológica ao processamento de sinais. *Anais do III CIMMEC*. 2014, SBM.

94. Ifeachor, Emmanuel e Jervis, Barrie. *Digital Signal Processing - A Practical Approach*. s.l. : Prentice Hall, 2002.
95. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IU-PAP e OIML. *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement - GUM - JCGM 100*. 2008.
96. Zhang, Nien Fan. Calculation of the uncertainty of the mean of autocorrelated measurements. *Metrologia*. 43, 2006.
97. Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). HBM MGCplus - Renowned and modular Data Acquisition System. [Online] [Citado em: 21 de 08 de 2015.] <http://www.hbm.com/en/menu/products/measurement-electronics-software/laboratory-test-stand/>.
98. Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML). *OIML R111*.
99. Martin, Victor. *Dissertação de Mestrado - Melhoria da confiabilidade metrológica metrológica na inspeção de componentes usinados com aplicação na indústria nuclear*. s.l. : PUC-Rio, 2010.
100. OAV Air Bearing. [Online] [Citado em: 07 de 08 de 2015.] www.oavco.com.
101. CEPEL. Laboratório de Acionamento e Segurança em Equipamentos Eletroeletrônicos. [Online] [Citado em: 21 de 08 de 2015.] <http://www.cepel.br/main.jsp>.
102. Santos, Wesley Paulo. Monografia. [Online] 07 de 06 de 2015. <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAANGQAI/monografia>.
103. Toshiba. Inverter application manual - About Selecting Capacity of Inverter. [Online] [Citado em: 07 de 06 de 2015.] http://www.nuovaelva.it/files/docs/Toshiba/Inverter/Technical_Files-Files_tecnici/Application_manuals/English/.
104. ETP Transmission AB. [Online] [Citado em: 28 de 07 de 2015.] <http://www.etp.se/en/products/power-transmission/etp-techno>.
105. NSK do Brasil - Engenharia de Aplicação. Roteiro para Seleção de Rolamentos. [Online] [Citado em: 30 de 07 de 2015.] <http://www.rolamentoscbf.com.br/novo/downloads/nsk-manual-de-treinamento.pdf>.
106. SKF - Bearings. SKF Bearings - Estimating the frictional moment. [Online] [Citado em: 30 de 07 de 2015.] <http://www.skf.com/group/products/bearings->

units-housings/ball-bearings/principles/friction/estimating-frictional-moment/index.html.

107. SNR-Industry. Mancais auto-alinháveis SNR com caixas de ferro fundido ou de chapa de aço. 2011.
108. International Organization for Standardization (ISO). ISO 4965-1 - Metallic material — Dynamic force calibration for uniaxial fatigue testing . s.l. : ISO, 2012.

APÊNDICE A

ARTIGOS PUBLICADOS

Título do artigo: A COMPARISON BETWEEN ABNT NBR 12240, BS 7882 AND DIN 51309 STANDARDS FOR TORQUE CALIBRATION - IT IS TIME FOR A REVISION IN THE BRAZILIAN STANDARD

Autores: Rafael S. Oliveira; Claudio A. Koch; Luiz C. Cabrtal (Inmetro)

Congresso: Metrologia 2011

Data: 2011

Título do artigo: INFLUENCE OF OPERATIONAL PARAMETERS ON A HAND-OPERATED TORQUE STANDARD MACHINE

Autores: Rafael S. Oliveira; Rodrigo F. Guilherme; Luiz C. Cabrtal (Inmetro)

Periódico: Measurement

Data: 2012 (Edição 45)

Título do artigo: A NEW APPROACH TO TEST TORQUE TRANSDUCERS UNDER DYNAMIC REFERENCE REGIMES

Autores: Rafael S. Oliveira (UFBA/Inmetro); Simon Winter (TU-Ilmenau); Herman A. Lepikson (UFBA); Thomas Fröhlich (TU-Ilmenau); René Theska (TU-Ilmenau)

Periódico: Measurement

Data: Novembro 2014 (Edição 58)

Título do artigo: ESTIMATIVA DO TORQUE INERCIAL EM EIXOS GIRANTES - UMA ABORDAGEM METROLÓGICA AO PROCESSAMENTO DE SINAIS

Autores: Rafael Oliveira (UFBA/Inmetro); Rafael Claudino (UFBA); Leonardo Gusmão (UFBA); Ricardo Kalid (UFBA); Herman Lepikson (UFBA); Thomas Fröhlich (TU-Ilmenau)

Periódico e Congresso: 3º Congresso Internacional de Metrologia Mecânica (III CIMMEC)

Data: Outubro 2014 (Gramado-RS)

Observação: Artigo selecionado para compor edição especial do congresso na revista *Journal of Physics: Conference Series* (JPCS) publicada em 15 de Outubro de 2015 - Volume 648.

Título do artigo: NEW PROPOSALS FOR THE DYNAMIC TESTS OF TORQUE TRANSDUCERS

Autores: Rafael S. Oliveira (UFBA/Inmetro); Simon Winter (Ilmenau); Herman A. Lepikson (UFBA); Thomas Fröhlich (Ilmenau); René Theska (UFBA); Antonio C. P. Bitencourt (IFBA); Renato R. Machado (Inmetro)

Congresso: 58th Ilmenau Scientific Colloquium
Data: Setembro 2014

Título do artigo: UNCERTAINTY OF MEASUREMENT FOR THE INERTIAL
TORQUE ESTIMATION IN ANGULAR ACCELERATION
RAMPS OF ROTATING SHAFTS

Autores: Rafael S. Oliveira (UFBA/Inmetro); Thomas Fröhlich
(Ilmenau); Herman A. Lepikson (UFBA); Simon Winter
(Ilmenau); René Theska (UFBA)

Congresso: Euspen's 15th International Conference & Exhibition (Leuven,
Bélgica)

Data: Junho 2015

Título do artigo: A NEW PROPOSAL FOR THE DYNAMIC TEST OF TORQUE
TRANSDUCERS

Autores: Rafael S. Oliveira (UFBA/Inmetro); Thomas Fröhlich
(Ilmenau); Herman A. Lepikson (UFBA); René Theska
(UFBA); Wagner A. Duboc (CEPEL)

Congresso: IMEKO 2015

Data: Agosto/Setembro 2015

APÊNDICE B

DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DAS BANCADAS

B.1. As Bancadas Experimentais

As bancadas foram montadas no Laboratório de Ensaio de Motores Elétricos do Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (CEPEL). O Laboratório de Acionamentos e Segurança em Equipamentos Eletroeletrônicos, inaugurado pelo CEPEL em 1986, foi o primeiro laboratório do Brasil inteiramente equipado para fazer ensaios de todos os tipos de proteção de equipamentos elétricos destinados a áreas com atmosferas potencialmente explosivas. É acreditado pelo INMETRO e possui instalações para ensaios de inversores de frequência e motores de indução cuja finalidade é avaliar a eficiência energética e atestar conformidade às normas do programa de etiquetagem de motores desenvolvido pelo PROCEL¹⁰¹.

B.1.1. Componentes da Bancada #1

Os equipamentos que compõem a bancada #1 são os seguintes:

- Motor de indução trifásico de alto rendimento
 - Fabricante: Voges
 - modelo: VTop
 - velocidade nominal: 3540 rpm ($370,71 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
 - Potência nominal: 15 kW
 - Torque nominal: 40,46 N·m
- Inversor de frequência
 - Fabricante: WEG
 - Capacidade: 15 kW
 - Modelo: CFW-11;
- Transdutor de torque:
 - Fabricante: HBM
 - Modelo: T10F (tipo flange)
 - Capacidade nominal: 500 N·m
 - Classe de precisão: 0.2 (DIN 51309)

- Sensor de velocidade:
 - Encoder incremental embutido no transdutor de torque
 - Tipo: disco ótico com 360 divisões mecânicas (ranhuras)
- Sistema de aquisição de dados (DAQ):
 - Fabricante: HBM
 - Amplificador digital: MGC
 - Placa: ML60 (torque e velocidade)
 - Software: Catman

Originalmente o sistema funciona como banco de teste de motores no laboratório. Assim, a montagem constante da bancada corresponde ao conjunto freio dinamométrico e transdutor de torque, onde podem ser acoplados vários tipos de motores elétricos a serem ensaiados. A Figura B.1.a mostra como fica a montagem original onde o transdutor (detalhe na Figura B.1.b) trabalhava com ambos os lados acoplados ao motor em teste na bancada e ao freio dinamométrico.

Para que os testes de acionamento pudessem ser realizados, foi necessário desacoplar o transdutor da parte do freio dinamométrico de forma a evitar cargas desconhecidas de atrito e um alto valor de inércia a ser acionado. O sistema então permaneceu com o transdutor em balanço acoplado somente ao motor elétrico (Figura B.1.c e Figura B.1.d) por uma flange. Foi então selecionado um motor elétrico de indução trifásico de alto rendimento que foi montado na bancada e depois teve o transdutor acoplado a ele.

No CEPEL, o ensaio de motores é realizado sob controle de um software supervisor que aciona e controla todas as bancadas do laboratório e organiza a aquisição de dados das grandezas mecânicas e elétricas que são utilizadas nos ensaios. Para os testes de acionamento, o controle via supervisor foi desativado e substituído por um inversor de frequência ligado diretamente nos conectores da carcaça do motor. A aquisição dos dados de velocidade do transdutor também foi desativada do painel do supervisor e realizada diretamente em uma unidade de aquisição de dados (DAQ) independente e que é conectada diretamente ao PC.

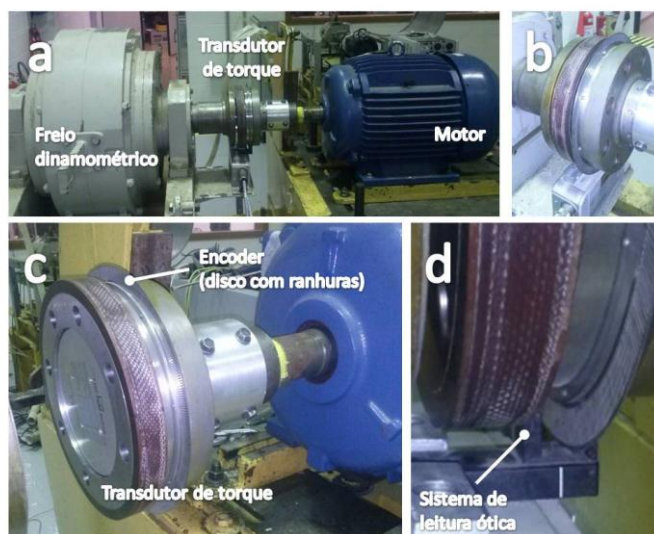


Figura B.1 - Bancada #1: (a) montagem original para ensaio de motor; (b) detalhe do transdutor de torque na montagem original; (c) adaptação para teste de acionamentos com transdutor desacoplado do freio dinamométrico e adaptado para trabalhar em balanço; (d) detalhe do sistema de leitura ótica do disco com ranhuras do *encoder*.

B.1.2. Componentes da Bancada #2

O primeiro conjunto é original da bancada, com motor e transdutor que foram selecionados de acordo a sua capacidade de aplicar aceleração ao eixo com os momentos de inércia de massa pretendidos na geração do torque nos acionamentos. Assim como a bancada #1, o inversor de frequência utilizado não faz parte da montagem original das bancadas, pois nestas condições, os acionamentos são realizados por sistema supervisor de controle. Estes equipamentos estão listados abaixo:

Os equipamentos que compõem a bancada #2 são os seguintes:

- Motor de indução trifásico de alto rendimento
 - Fabricante: Weg
 - modelo: W22 Plus
 - velocidade nominal: 1770 rpm ($370,71 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
 - Potência nominal: 2,2 kW
 - Torque nominal: 40,46 N·m
- Inversor de frequência
 - Fabricante: WEG
 - Capacidade: 2,2 kW
 - Modelo: CFW-09;

- Transdutor de torque:
 - Fabricante: HBM
 - Modelo: T12 (tipo flange)
 - Capacidade nominal: 200 N·m
 - Classe de precisão: 0.2 (DIN 51309)
- Sensor de velocidade:
 - Encoder incremental embutido no transdutor de torque
 - Tipo: disco ótico com 360 divisões mecânicas (ranhuras)
- Sistema de aquisição de dados (DAQ):
 - Fabricante: HBM
 - Amplificador digital: Quantum MX460
 - Software: Catman AP

De acordo aos resultados obtidos com os testes de acionamento da bancada #1, foi possível concluir que o conjunto inversor de frequência e motor elétrico AC pode ter várias combinações que possibilitarão diferentes capacidades de acionamento. Esta conclusão é interessante e ampla para a aplicação destes equipamentos em várias faixas de torque.

O banco disponível para os testes tem uma capacidade nominal de torque até 100 N·m, potência nominal de 2,2 kW e velocidade nominal de 1770 rpm ($185,35 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$). O motor é especial para a utilização em regimes que demandam por controle das velocidades angulares em patamares constantes mesmo sob efeitos de carga constante, como é o procedimento de ensaio em motores com frenagem, pois tem alto valor de momento de inércia de massa de seus rotores, o que transfere um torque inercial de resistência ao movimento de aceleração do próprio motor. Portanto, sob uma restrição de segurança do laboratório, os acionamentos testes deveriam chegar num valor máximo aproximado de torque a ser medido entre 10% e 20% da faixa nominal do transdutor da bancada selecionada.

B.2. O Motor Elétrico das Bancadas

Em uma breve comparação entre motores devido às características facilitadoras, o tipo de motor AC assíncrono é um bom componente a ser estudado

para funcionar como acionador do eixo de medição, juntamente com os modos de controle da velocidade que são acessíveis e comumente usados no mercado.

As curvas de torque *versus* velocidade, caracterizadoras dos motores, devem ter sempre o mesmo padrão onde pode-se apontar os valores máximos de torque que o motor pode fornecer a uma determinada velocidade. O torque nominal é aquele limite em que o motor pode trabalhar continuamente sem perdas ou risco de sobrecargas (ver Figura B.2).

O torque máximo inclui a região que permite ao motor o acionamento com torques de até 300% o torque nominal, porém somente para acionamento de curta duração, ou seja, torques não contínuos.

Sobre os motores elétricos mais comumente utilizados, uma breve comparação pode ser destacada:

- *Motor DC*: É uma máquina síncrona onde sua principal característica é o controle preciso, entre amplos limites, da velocidade. É, geralmente, mais caro do que os outros tipos de motores e são menos usados, pois precisam de manutenção constante e atualmente já existem técnicas mais avançadas de aplicação deste controle de velocidade a outros modelos de motor;

- *Servomotor*: Assim como o motor DC, o servomotor é uma máquina síncrona que tem um gerador de sinais (*'Resolver'*) acoplado a ele. As características mais desejadas em um servomotor são o torque constante em uma larga faixa de velocidade e uma alta capacidade de sobrecarga.

- *Motor AC*: Diferente dos tipos anteriores, os motores AC (aos quais nos referimos) são máquinas assíncronas e por isso são construídas de maneira diferente dos motores já citados. São motores de baixo custo de aquisição quando comparados com os outros e também baixo custo de manutenção. É robusto e pode alcançar potências maiores que 1 MW.

Dentre os parâmetros de seleção de um motor AC assíncrono, a depender de qual torque máximo seja requisitado num projeto de acionamento, a chamada potência nominal será definida como o produto entre a velocidade nominal e o torque nominal. Caracteristicamente, o perfil da curva velocidade *versus* torque se apresenta como na Figura B.2.

O torque intermitente é um meio termo entre os regimes de aceleração e o regime de torque contínuo (nominal).

Os torques ainda devem ser identificados como de carga ou de aceleração. O primeiro representa aquele esforço referente somente à carga que se encontra no eixo, como pesos e atritos, enquanto que o segundo é composto pelas componentes inerciais relacionadas do acionamento, que aparecem somente em regimes de aceleração.

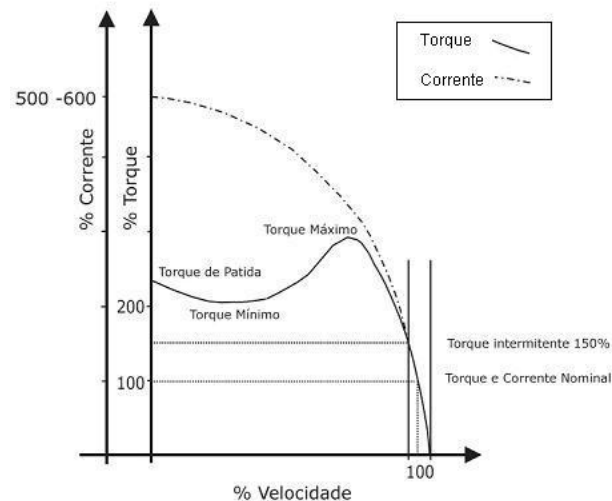


Figura B.2 - Curva característica de velocidade versus torque de um motor elétrico de indução¹⁰².

Para que seja possível a variação de frequência, os inversores de frequência possuem vários parâmetros que podem ser configurados de acordo com a necessidade da operação. O dimensionamento do inversor de frequência é feito principalmente pela corrente presente no motor.

Para garantir precisão elevada o inversor de frequência faz o controle de velocidade do motor em malha fechada, o que torna necessário a utilização de um sinal de realimentação de velocidade. A realimentação de velocidade é obtida por meio de um transdutor de velocidade (encoder incremental) acoplado ao eixo do motor.

As rampas permitem ao usuário do inversor modificar a velocidade de rotação do motor de forma controlada, especificando o valor de tempo e velocidade final pode-se assim controlar a aceleração e a desaceleração do motor.

Os inversores possuem normalmente dois tipos de rampas de aceleração:

- Rampa linear: A rampa linear é a mais simples, e indicada para cargas com pouca inércia. Na transição da velocidade zero para a rampa e da rampa para a velocidade final, o sistema acoplado ao motor recebe um

impulso chamado de *jerk*. Este impulso produz vibrações no equipamento acoplado ao motor.

- Rampa em “S”: recurso no qual se permite obter a aceleração/desaceleração de cargas onde se necessita de uma partida/parada de forma suave, não ocorrendo choques mecânicos no sistema. A rampa “S” pode ser ajustada em função da aplicação através do software do inversor (parâmetros de programação), onde se define os tempos de aceleração e desaceleração e também o percentual de distorção “S” da curva.

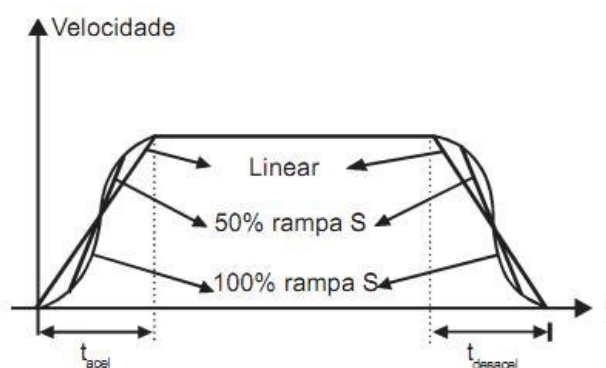


Figura B.3 - Rampas de aceleração e desaceleração conduzidas por um inversor de frequência⁸⁸.

A capacidade de aceleração do conjunto dependerá de uma série de parâmetros que devem ser determinados e ajustados no conjunto a priori aos carregamentos.

O principal parâmetro a ser ajustado no inversor é o tempo de aceleração. Características do conjunto acionador e da estrutura mecânica do eixo a ser acelerado interferem diretamente neste parâmetro. O tempo de aceleração ajustado no inversor deve ser maior que o tempo de aceleração mínimo calculado para o conjunto. A Equação B.1 mostra como o tempo de aceleração mínimo é calculado para um sistema a ser acionado por um inversor de frequência¹⁰³:

$$t_{a_min} = \frac{(\theta_{mot} + \theta_{eixo}) \cdot \Delta v}{1,2 \cdot T_{nom_mot} - T_{carga}} \quad (B.1)$$

Onde:

t_{a_min}	Tempo mínimo de aceleração	(s)
θ_{mot}	Momento de inércia de massa do motor	(kg·m ²)

θ_{eixo}	Momento de inércia de massa total do eixo	(kg·m ²)
Δv	Degrau de velocidade	(rad·s ⁻¹)
T_{nom_mot}	Torque nominal do motor	(N·m)
T_{carga}	Torque da carga no eixo	(N·m)

B.3. O Encoder Embutido no Transdutor

Os transdutores de torque utilizados em ambas as bancadas são capazes também de realizar medições de velocidade por um *encoder* incremental ótico nele embutido, onde o disco com as ranhuras é fixo ao corpo do transdutor e na base deste, onde se localiza a antena para captação do sinal elétrico da *Ponte de Wheatstone*, correspondente à variação do torque, do corpo do transdutor, existe também o sistema ótico que reconhece a passagem destas ranhuras e transforma essa variação em sinal de velocidade angular.

Quando o rotor do transdutor gira, pulsos de tensão gerados de acordo com o número de ranhuras por revolução e a frequência desses pulsos é proporcional à velocidade angular. A luz infravermelha emitida pela fonte passa por uma lente condensadora e pelo disco com as ranhuras, atingindo o receptor que tem duas linhas defasadas em 90° que correspondem a dois canais separados de leitura. Esta defasagem fornece informações a respeito da direção da rotação. Um pré-amplificador transforma os pulsos em ondas puramente quadradas com níveis de tensão adaptados à aquisição. O número total de ranhuras no disco pode variar de acordo com o tamanho e o modelo do transdutor. No processo de leitura das ondas quadradas geradas da recepção dos pulsos dos dois canais, o transdutor é eletronicamente capaz de dobrar o número total de pulsos em uma revolução pelo módulo da diferença de tensão entre os dois canais da abertura C1 e C2.

A Figura B.4 detalha o princípio do disco com ranhuras e as ondas quadradas obtidas de cada canal do receptor IR. Nos sinais de saída estão a dupla frequência de pulsos, que dobra o número de pulsos totais, e o canal com valor constante de tensão que determina o sentido da rotação. No caso da figura, existe uma inversão no sentido de rotação.

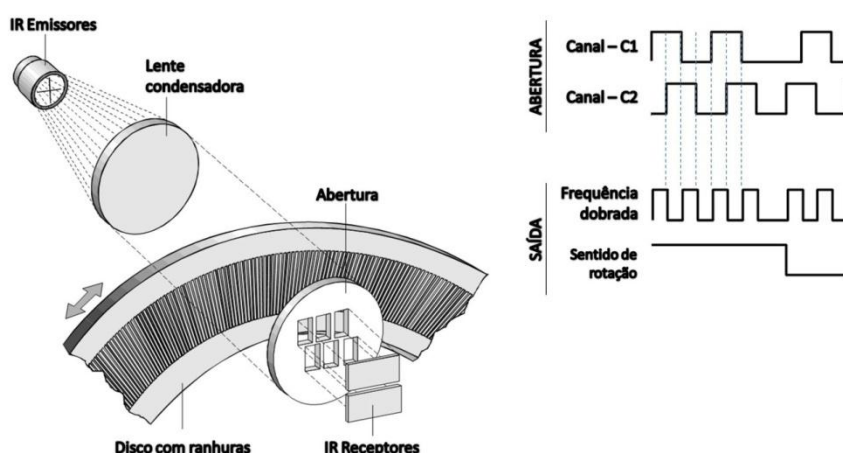


Figura B.4 - Princípio de funcionamento do encoder acoplado ao transdutor de torque utilizado na bancada #1⁴⁶.

B.4. Os Sistemas DAQ Utilizados nas Bancadas



Figura B.5 - Sistemas DAQ utilizados nas bancadas: (a) MGC-PLUS; (b) Quantum.

O sistema DAQ utilizado na bancada #1 é o modelo MGC-Plus (Figura B.5.a), da HBM, que é um sistema de aquisição de dados por sistema modular, com placas dedicadas à cada tipo de sensor empregado. A aquisição dos sinais acontece de forma paralela e simultânea com três taxas de medição independentemente do número de canais. A taxa de medição mais alta alcança 19,2kHz por canal. Placa de aquisição ML60B/AP17 específica para transdutores com sinais de torque e velocidade. Taxa máxima de pulsos por segundo de 10^6 . Segundo fabricante a precisão alcançada é de 0,005 %⁹⁷.

Já o Quantum MX460B (Figura B.5.b), sistema DAQ utilizado na bancada #2, tem 4 canais digitais com módulo de medição de frequência dinâmico medições de torque, velocidade rotacional, ângulo, posição e deslocamento. Muito utilizado em bancos de ensaio de acionamentos elétricos, motores a combustão ou em máquinas com eixos de rotação em geral. Possibilita taxas de amostragem de até 100 kHz por

O software de interface é o Catman, versão AP, do próprio fabricante do sensor e do DAQ, com identificação instantânea e automática de sensores em uma base de dados própria, ferramentas de visualização dos canais de medição com objetos gráficos customizáveis. A aquisição dos dados é feita em tempo real e armazenada no PC. Após as medições, o software exporta em formato *.xls* ou *.dat*, com uma coluna de tempo e outras duas de velocidade e torque.

Pelo software é possível o ajuste dos filtros digitais e das taxas de aquisição aplicadas ao DAQ. Os sistemas DAQ já traduzem as contagens de pulsos em valores de velocidade angular de rotação do sensor.

B.5. O Acoplamento Hidráulico

Seu princípio de funcionamento está explicado na Figura B.6.a e Figura B.6.b. O modelo selecionado para a montagem foi o ETP-TECHNO-30 com as dimensões representadas na Figura B.6.c e as principais especificações técnicas apresentadas na Tabela B.1.

O acoplamento tem ótima capacidade para o torque de transmissão rígida, baixos valores de massa e momento de inércia de massa e serão utilizados tanto na conexão entre o eixo e o transdutor como no acoplamento entre eixo e disco de referência, representadas na Figura B.6.c em amarelo para o contato com o eixo e em vermelho para o contato com a parede interna do disco.

Ainda segundo o fabricante, as áreas de contato entre o acoplamento e as paredes do eixo e dos furo devem preencher toda a área disponível do acoplamento, sem espaços ou concentração de contato.

A partir das dimensões e especificações desses acoplamentos, pode-se desenvolver os demais projetos e especificações da montagem, principalmente por ter definido um valor de diâmetro de eixo de 30 mm.

A parede do acoplamento com o fluido pressurizador fica no encaixe entre o eixo e o furo. Apertando o parafuso do acoplamento, que está em contato com o fluido, aumenta a pressão e conseqüentemente as paredes do acoplamento se expandem, realizando uma força também nas paredes do eixo e do furo. O aperto nesses parafusos deve ser controlado por um torquímetro. Estes acoplamentos são balanceados de forma a já funcionarem em aplicações que tenham eixos girantes em altas velocidades e com altos torques de transmissão. A concentricidade na

montagem alcança valores menores que 0,006 mm de acordo às informações do fabricante¹⁰⁴.

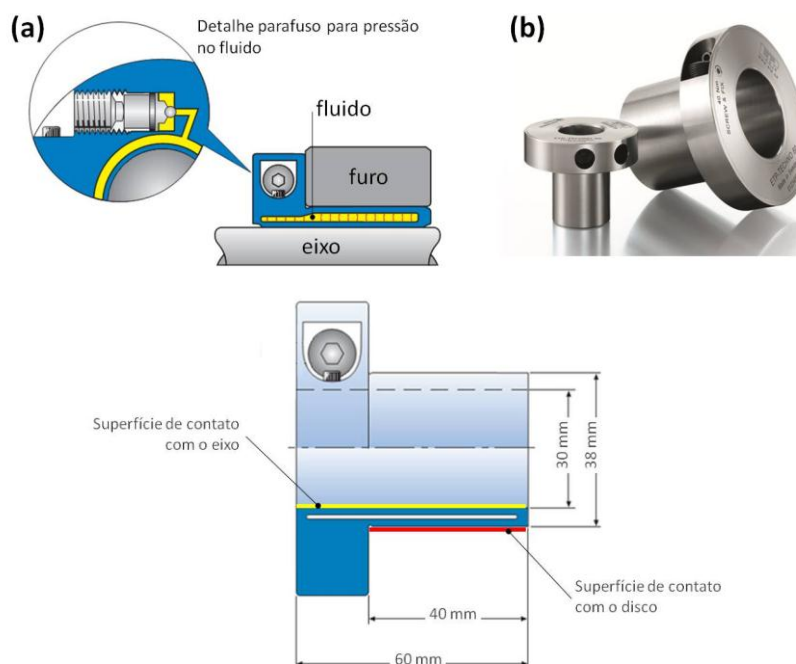


Figura B.6 – (a) Princípio de funcionamento do acoplamento hidráulico; (b) Foto de catálogo do componente; (c) Dimensões do modelo ETP-TECHNO-30 selecionado para a montagem da bancada #2¹⁰⁴.

Tabela B.1 - Principais especificações técnicas do acoplamento hidráulico ETP-TECHNO-30¹⁰⁴.

Parâmetro	Valor
Torque máximo	500 N·m
Força axial máxima	26 kN
Concentricidade	< 0,006 mm
Torque de aperto	16 N·m
Massa	0,69 kg
Momento de inércia de massa	$0,54 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Tolerâncias para a montagem	Eixo - h8 Furo - H7

B.6. Eixo de transmissão e mancais

O projeto do eixo de transmissão e da estrutura de sustentação da montagem se baseou numa configuração simples e segura. Este capítulo mostra alguns

cálculos principais para especificação dos componentes, principalmente visando as capacidades de carga e influências de atrito.

A restrição inicial do projeto fica por conta do diâmetro do eixo, que deve seguir os 30 mm da especificação de diâmetro interno do acoplamento hidráulico, com tolerância de fabricação h7. O comprimento total do eixo foi determinado para 300 mm e foi realizada uma simulação para levantamento da sua deformação total sob carregamento do torque máximo de 20 N·m proposto no projeto, que foi calculada em 0,001 rad.

Os dois mancais de sustentação devem ser montados e alinhados sobre uma estrutura rígida, separada do conjunto estrutural do acionador. O eixo de transmissão é rígido considerando inclusive a conexão com o disco inercial. Os graus de liberdade da montagem ficam restritos ao acoplamento elástico (flexível) que existe entre o transdutor e o eixo de transmissão. Este acoplamento é considerado parte do conjunto estrutural do transdutor, pois é utilizado na aplicação original do sensor nos bancos de teste de motores.

Os mancais de rolamento selecionados para a bancada #2 são do tipo esfera deslizante, autocompensadores e com bucha, o que facilita sua montagem e desmontagem.

Nos mancais autocompensadores o anel interno e a gaiola com as esferas giram livremente ao redor do centro do rolamento, permitindo com isto a correção de erros de alinhamento¹⁰⁵. Em princípio, a característica de auto compensação permite um determinado grau de liberdade de segurança, ajudando a garantir a manutenção do alinhamento durante acionamento do eixo.

A Figura B.7 mostra o esquema do eixo com a distribuição das forças de reação nos mancais de rolamento. As distâncias entre os mancais foram definidas na fabricação e a distância da força peso ($F_{peso,d}$) ao mancal mais próximo foi estimada considerando a distância do centro de massa do disco, montado no acoplamento flexível, para o mancal. O cálculo da carga efetiva nos mancais é realizado pelas Equações B.2 e B.3¹⁰⁶.

Essas forças de reação são calculadas estaticamente. A sua transdução para uma carga equivalente dinâmica depende de uma estimativa da carga axial. Pelo princípio da montagem e do acionamento, as cargas axiais presentes são muito baixas pois não há esforço significativo nesta direção. Assim, a força equivalente dinâmica pode ser considerada igual a força estática calculada¹⁰⁷.

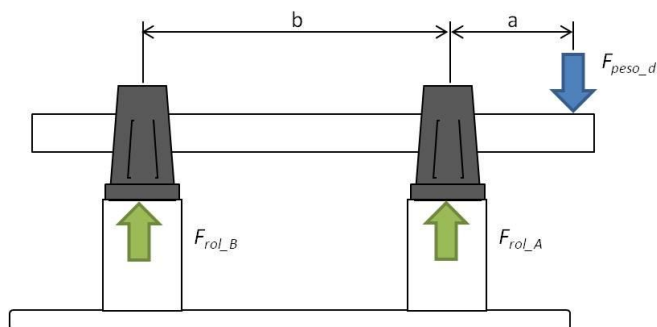


Figura B.7 – Forças distribuídas no eixo.

$$F_{rol_A} = \left(\frac{a + b}{b} \right) \cdot F_{peso_d} \quad (B.2)$$

$$F_{rol_B} = \left(\frac{a}{b} \right) \cdot F_{peso_d} \quad (B.3)$$

O modelo de rolamento selecionado foi o UK207 V22 com bucha de conexão UK2307, com diâmetro interno (d_{int_rol}) de 30 mm. O torque de atrito total (T_{atr}) será equivalente à soma dos torques de atrito em cada rolamento, conforma equação B.4.

$$T_{atr} = 0,5 \cdot \mu \cdot (F_{rol_A} + F_{rol_B}) \cdot d_{int_rol} \quad (B.4)$$

Considerando a situação mais crítica para F_{peso_d} como sendo a soma do peso do disco D40 com o peso do acoplamento hidráulico, a Tabela B.2 mostra os resultados para as forças e os torques de atrito, o que teoricamente demonstra que esse tipo de rolamento, juntamente a sua montagem, são compatíveis à aplicação na bancada de teste pois, o torque de atrito calculado ficou bem abaixo de 1% do torque que se pretende medir com o disco D40 (ver Tabela 4.12) e as forças radiais estão muito abaixo da carga limite deste modelo de mancal, que é de 25 kN segundo¹⁰⁷.

A verificação do torque de atrito estimado pôde ser realizada durante os acionamentos cujos resultados estão demonstrados mais adiante e a utilização desses valores para uma eventual correção no valor de torque inicial.

Importante destacar que a forma de utilização desses mancais pode ser considerada especial, a medida que as horas de uso são bem reduzidas se comparadas à normalidade das aplicações as quais esses componentes são

projetados e existe uma maior intermitência nos acionamentos, o que permite uma constante verificação e manutenção, como a lubrificação por exemplo.

Tabela B.2 - Dimensões básicas dos discos e os valores calculados de massa e momento de inércia de massa.

a	b	$F_{peso,d}$	$d_{int,rol}$	μ^*	$F_{rol,A}$	$F_{rol,B}$	T_{atr}
/ m	/ m	/ N	/ m	---	/ N	/ N	/ N·m
0,050	0,200	111,58	0,030	0,001	139,47	27,89	0,0025

* Coeficiente de atrito para rolamentos de esferas autocompensadores (2).

APÊNDICE C

PRÉ-TESTES DA MONTAGEM

C.1. Teste de sincronismo de sinais

Como já foi explicado na descrição dos materiais da bancada #2, os valores de torque e velocidade são obtidos do mesmo sensor e os dados mostrados em um mesmo sistema DAQ. O sincronismo entre o sinal de torque e o sinal de aceleração, derivado das medições de velocidade, deve ser verificado. Dentro das condições apresentadas de equivalência dos equipamentos, era esperado que, como aconteceu para a bancada #1, os sinais de torque e aceleração estivessem sincronizados, mas não foi isso que foi verificado.

Os primeiros testes de acionamento da bancada #2 foram realizados somente com o transdutor em balanço, como foram os acionamentos da bancada #1, sem o eixo de transmissão para que se testasse as questões referentes à aquisição e apresentação dos resultados. No intervalo de velocidade de $104,72 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ até $157,08 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (1000 rpm até 1500 rpm), com tempo de aceleração ajustado para 3,0 s, taxa de aquisição de 300 Hz e aplicação de filtro digital passa baixa de 5 Hz, as curvas obtidas de torque e aceleração estão mostradas na Figura C.1.

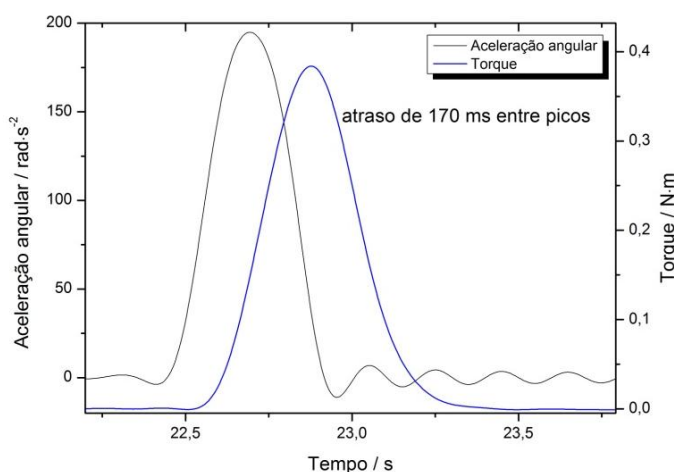


Figura C.1 – Identificação do atraso entre os sinais de torque e aceleração.

Observa-se um atraso do sinal de torque de aproximadamente 170 ms, estimado entre os picos, para este acionamento. De certa forma este foi um resultado inesperado pois não havia dentro dos métodos de ajuste externo do

software ou da unidade de aquisição algum procedimento que justificasse essa defasagem.

O grupo resolveu então entrar em contato com a empresa fornecedora e representante técnica da HBM no Brasil^[1]. Após o contato, o grupo concluiu, por dedução, que se trata de um ajuste de fábrica do equipamento e que, embora não influencie diretamente a utilização do sensor nos ensaios de motores rotineiros do laboratório do CEPEL, o fenômeno não era de conhecimento da equipe do laboratório.

A identificação da defasagem entre os sinais constitui também uma forma de avaliar o sensor de torque já que, como demonstrado no capítulo 2.1, na maioria das aplicações dinâmicas, os sinais de torque e velocidade são importantes e obtidos simultaneamente.

Na continuação de avaliação dos acionamentos realizados na bancada #2, os dados de torque e aceleração necessitaram ser sincronizados manualmente através do deslocamento dos dados no eixo do tempo. Essa manipulação dos dados já acontecia para a sincronização das rampas, o que gera uma incerteza que é traduzida nos desvios entre as leituras de um mesmo ponto indexado. A necessidade de uma segunda manipulação, agora entre a curva de torque e a curva de aceleração vai gerar mais uma contribuição à incerteza, o que será avaliado no capítulo específico do tema.

C.2. Abordagens para análise de vibração (teste de varredura de velocidades)

A identificação de frequências naturais de um sistema mecânico em rotação é de extrema importância tanto para a confiabilidade metrológica das medições quanto para a segurança. A literatura apresenta várias referências ricas na abordagem da determinação de frequências naturais em eixos girantes tanto na ordem teórica quanto na ordem prática e experimental. A proposta deste capítulo é apresentar,

¹ *Relato do contato [16/07/2015]: Em contato telefônico com a representante da empresa Spectris do Brasil, os técnicos foram questionados sobre qual seria a explicação para essa defasagem. Os técnicos orientaram o grupo a verificar os ajustes de taxa de aquisição, filtro digital e base de tempo realizados nos canais de leitura. Não foi encontrado nenhum ponto de erro no procedimento desses ajustes. Os técnicos solicitaram que algumas medições fossem repetidas para que eles pudessem avaliar e entrar em contato com a matriz da HBM na Alemanha. Depois desse contato, os técnicos da Spectris do Brasil não retornaram.*

num primeiro momento, que tipo de modelagem pode-se aplicar ao cálculo de frequências de ressonância para o tipo de montagem da bancada #2.

A disposição dos componentes da bancada #2 pode ser equiparada ao modelo de dois corpos de inércia conectados por um eixo (Figura C.2). O primeiro corpo corresponderia ao conjunto motor de acionamento e transdutor de torque, enquanto o segundo corpo inercial deve se referir ao disco inercial de referência. O eixo e os acoplamentos tem momentos de inércia desprezíveis em relação aos corpos mas se somam à rigidez do sistema. Os atritos presentes tem influência no amortecimento das amplitudes mas pouca influência na determinação das frequências naturais⁴⁶.

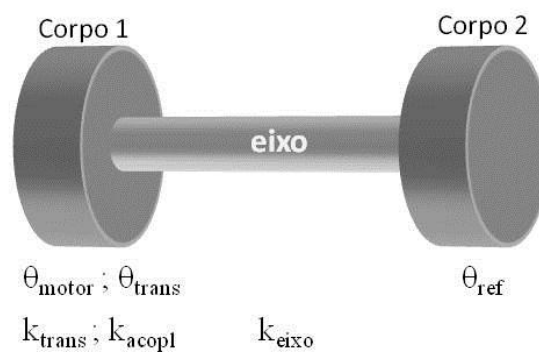


Figura C.2 – Modelo simplificado da bancada #2 para estimativa da frequência natural da montagem.

O cálculo do primeiro modo torcional deste modelo pode ser realizado conforme Equação C.1, obtidas de⁴.

$$f_{res_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{k_T \cdot \left(\frac{1}{\theta_{crp_1}} + \frac{1}{\theta_{crp_2}} \right)} \quad (C.1)$$

Onde:

f_{res_1}	Frequência natural, 1º modo torcional	(Hz)
k_T	Rigidez total	(kN·m·rad ⁻¹)
$\theta_{crp_1}; \theta_{crp_2}$	Momentos de inércia de massa dos corpos	(s)

Preenchendo os parâmetros com os dados dos componentes da bancada #2, a coluna de cor cinza da Tabela C.1 apresenta esses parâmetros e o resultado para a frequência natural. Observa-se que o primeiro modo permite uma excelente zona

de trabalho e o valor está muito acima da velocidade máxima que o motor da bancada pode atingir.

Tabela C.1 - Valores estimados para o primeiro modo de vibração torcional no modelo simplificado da bancada. (coluna em cinza) parâmetros da bancada #2; (demais colunas) demonstração com a variação do modelo do transdutor em calibração.

Parâmetro	HBM-T12 (100 N·m) Bancada #2	HBM-T10 (100 N·m)	HBM-T20WN (100 N·m)	HBM-T20WN (20 N·m)
$k_{eixo} / \text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$	20,83	20,83	20,83	20,83
$k_{trans} / \text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$	230	160	22	3,25
$k_{acopl} / \text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$	138	138	141	31
$\theta_{tra} / \text{kg}\cdot\text{m}^2$	0,005	0,0034	0,0000546	0,0000062
$\theta_d / \text{kg}\cdot\text{m}^2$	0,05	0,05	0,05	0,05
$\theta_{mot} / \text{kg}\cdot\text{m}^2$	0,215	0,215	0,215	0,215
f_{res_1} / Hz	102,14	100,62	78,72	40,12
$f_{res_1} / \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	641,77	632,20	494,63	252,07

Como exercício para o método e demonstração da necessidade deste tipo de avaliação para as futuras aplicações em bancadas de calibração, as demais colunas projetam valores de frequência natural para montagens que variam somente o modelo do transdutor de torque que esteja em calibração. São simulados os modelos HBM-T10-Flange, faixa de 100 N·m e HBM-T20WN-Eixo, faixas de 100 N·m e 20 N·m.

Observa-se que transdutores do tipo flange, de mesma faixa mas de modelos diferentes, apresentam valores de frequência natural muito próximos. Já os transdutores do tipo eixo, que são menos rígidos e tem momento de inércia de massa menores, mesmo se mantendo a faixa de capacidade de carga do transdutor ou alterando-a, os valores atingidos de frequência natural são relativamente muito menores que os atingidos nos sensores de flange.

O cálculo teórico obviamente é muito importante para a estimativa das condições de contorno que devam ser levadas em conta nas restrições aos valores de velocidade angular a serem aplicados nos acionamentos. No entanto, por vezes a montagem pode conter elementos ou subestruturas desconhecidas para a consideração correta dos parâmetros de rigidez e inércia, além de outros tipos de estímulos, além do torcional, que possam estar acontecendo na estrutura. Nestes casos o recomendável é a realização de um teste de varredura de velocidades.

O teste de varredura é utilizado na norma "Calibração de força dinâmica em máquinas de ensaio de fadiga uniaxiais"¹⁰⁸ exatamente para a identificação de regiões de ressonância no domínio da frequência que deverão ser evitadas nas faixas de frequência a serem utilizadas para os acionamentos axiais da calibração.

O teste é simples e consiste na desaceleração do eixo, através do desligamento do motor elétrico, com a estrutura de transdutor e disco montada, desde um patamar de alta velocidade até sua total parada. Durante essa desaceleração os sinais de torque e velocidade são amostrados (Figura C.3). Uma posterior avaliação desses dados através da implementação da ferramenta de análise de FFT mostrará se o conjunto passou por alguma faixa de frequências (velocidades angulares) que venham caracterizar uma faixa de ressonância.

O grupo do CEPTEL identificou que em um outro banco de teste de motores que estava momentaneamente desativado, havia um motor cuja inércia era aproximadamente 4 vezes a inércia do motor da bancada #2 e atingia 3500 rpm e que a estrutura base de encaixe do motor a ser ensaiado trabalhava com um sistema de molas, para dar maior folga aos ajustes de alinhamento. Ou seja, havia naquele banco uma componente estrutural da qual não se tinha conhecimento medido de valores de inércia e que, por este motivo, agregado à maior inércia do motor, o teste de varredura pudesse pegar algum comportamento de ressonância. O transdutor de torque tinha as mesmas características mecânicas do modelo da bancada #2 e o encaixe ao eixo também seria o mesmo.

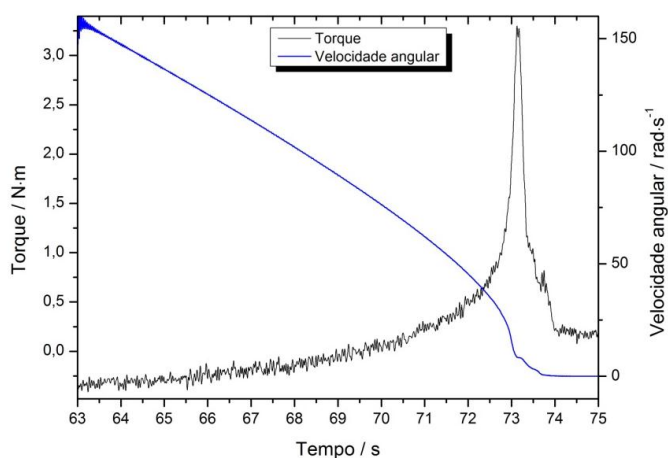


Figura C.3 – Teste de varredura de velocidade.

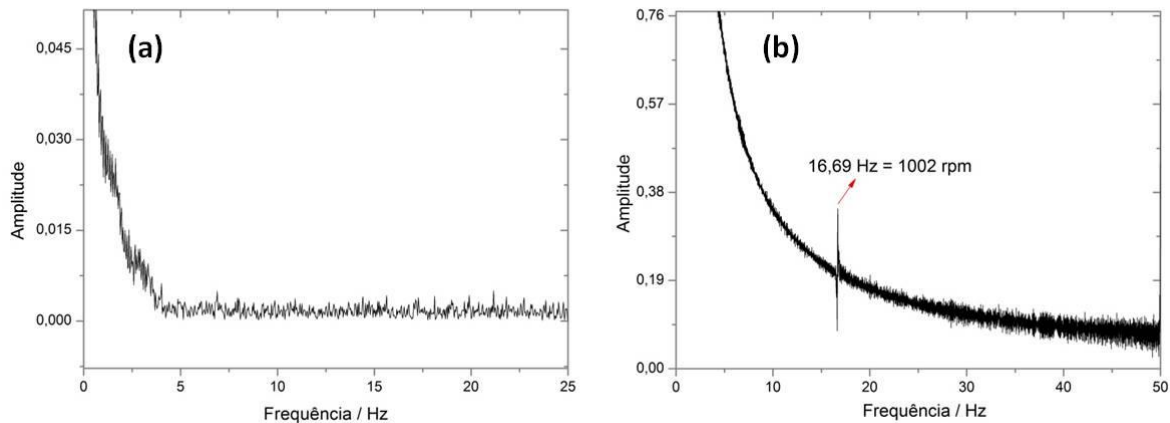


Figura C.4 – Gráficos de amplitude das análises de FFT dos sinais de velocidade nos testes de varredura nas bancadas de 100 N·m (bancada #2) e 200 N·m (bancada adicional).

A Figura C.4 mostra os dois gráficos de amplitude para os resultados das análises de FFT nos sinais de velocidade dos testes de varredura de velocidades na bancada #2 e na bancada adicional.

No gráfico referente à bancada #2, não existe um trecho saliente que indique a existência de ressonância, enquanto no gráfico referente ao teste realizado na bancada adicional, é possível identificar um ponto, ou região em torno de um ponto, em que ocorre a ressonância. O valor em frequência é 16,69 Hz, equivalente a aproximadamente 1000 rpm ($104,72 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$). Dessa forma, se esta bancada fosse utilizada, o ponto de $104,72 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ deveria ser evitado no acionamento.

Outros tipos de análise no domínio da frequência, como digramas de Bode para a avaliação de mudanças de fase na varredura de frequências, podem também ser aplicadas caso o usuário necessite de um estudo específico para faixas críticas de frequências de acionamento, como em valores muito altos de velocidade angular.

C.3. Testes de atrito

O atrito nos mancais pode ser percebido após alguns acionamentos. O primeiro teste foi realizado com a aceleração do eixo, sem discos acoplados, a partir da velocidade zero, ou seja, sem qualquer influência de cargas de atrito, até um patamar de velocidade definido em $52,36 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$. Pela curva de torque da Figura C.5 observa-se que, após o pico atingido devido ao torque inercial de aceleração, não há uma recuperação total para que o torque retorne a zero, permanecendo numa faixa de aproximadamente 1,1 N·m.

Num segundo teste, o atrito percebido nos acionamentos realizados entre patamares de velocidade, onde pode-se observar que existe uma pequena diferença, um degrau, entre os valores de torque lidos nos patamares de velocidade anterior e posterior ao acionamento. Como exemplo desse degrau, a Figura C.6.a mostra a curva de torque originada do acionamento com o eixo sem discos.

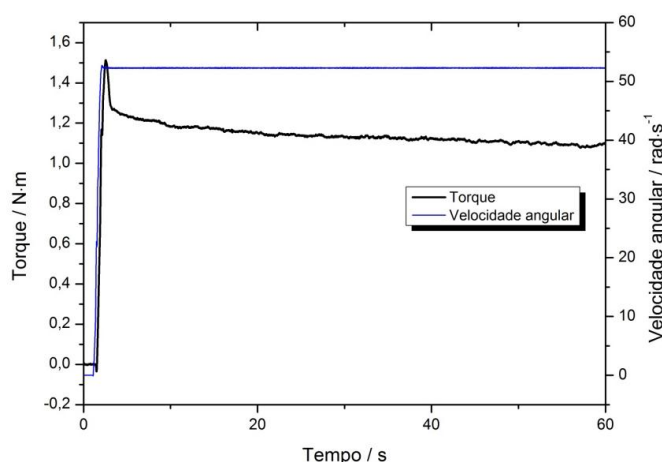


Figura C.5 – Medição do torque de atrito nos mancais. Acionamento de 0 rad·s⁻¹ até 52,36 rad·s⁻¹.

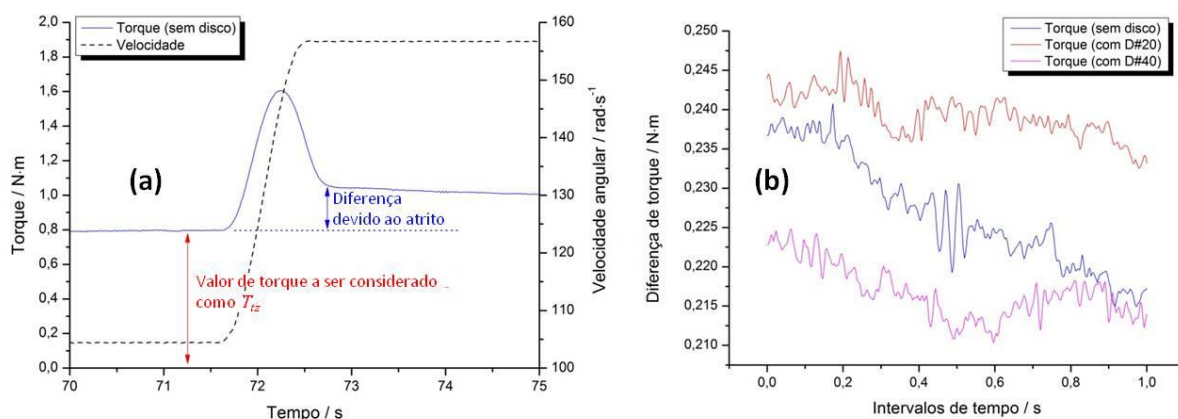


Figura C.6 – (a) Curva de torque originada do acionamento do eixo sem discos no intervalo de velocidade entre 104,72 rad·s⁻¹ e 157,08 rad·s⁻¹; (b) Diferença entre os valores de torque nos patamares anterior e posterior ao acionamento.

Focando nestes degraus e calculando a diferença entre os valores de torque posteriores e anteriores a cada acionamento, na Figura C.6.b pode-se observar uma tendência decrescente dessas diferenças, o que leva a conclusão que existe uma interferência sistemática do atrito dos mancais com tendência à estabilização.

A existência desse atrito em torno de 1 N·m, com uma variação no degrau de aproximadamente 0,25 N·m, vai contra o valor teórico calculado no Apêndice B para

este tipo de mancal de rolamento autocompensador, que atenderia perfeitamente ao proposto. Devido ao atrito, o conjunto do eixo teve um aumento na temperatura.

Em análise empírica, o grupo do CEPEL e o autor identificaram que aquele comportamento não é comum para aquele tipo de rolamento, o que derivou a conclusão que definitivamente, para configurar como elemento do projeto final de um sistema de calibração, o problema dos atritos deve ser estudado mais a fundo, utilizando inclusive rolamentos de mesmo modelo porém de outros fabricantes. Até a conclusão da pesquisa e da tese, não houve tempo hábil para a aquisição e substituição dos mancais por outros de fabricante diferente.

O valor medido do atrito, embora demonstre um comportamento sistemático, restringirá as medições e interpretações a serem obtidas dos testes na bancada #2. O valor inicial de torque, nos patamares de velocidade constante anteriores aos acionamentos, será considerado como parte do torque de tara T_{tz} .

APÊNDICE D

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES PARA A INCERTEZA DE MEDIÇÃO

D.1. Comparação entre o Método GUM e o Método Monte Carlo para o Método da Comparação Direta

Para ilustrar a boa coerência entre os métodos, as tabelas a seguir mostram os resultados das estimativas de incerteza de medição, para o acionamento com o disco D20, pelos métodos: (GUM) desenvolvido nas planilhas de cálculo e (GUM-WB e MMC-WB) implementados pelo software Workbench.

Tabela D.1 - Ponto com maior taxa positiva para o acionamento com D20.

Parâmetro	GUM	GUM-WB	MMC-WB
T_{ir} / N.m	1,133	1,133	1,133
$u_{T_{ir}}$ / N.m	0,000620	0,000620	0,000620
$U_{T_{ir}}$	0,17%	0,11%	0,11%
T_{tl} / N.m	1,1591	1,1591	1,1591
$u_{T_{tl}}$ / N.m	0,003348474	0,00335	0,00330
$U_{T_{tl}}$	1,24%	0,58%	0,58%
E / N.m	0,02655	0,02655	0,02650
u_E / N.m	0,0034	0,0034	0,0034
U_E	40%	26%	26%

Tabela D.2 - Ponto de torque de pico com D20.

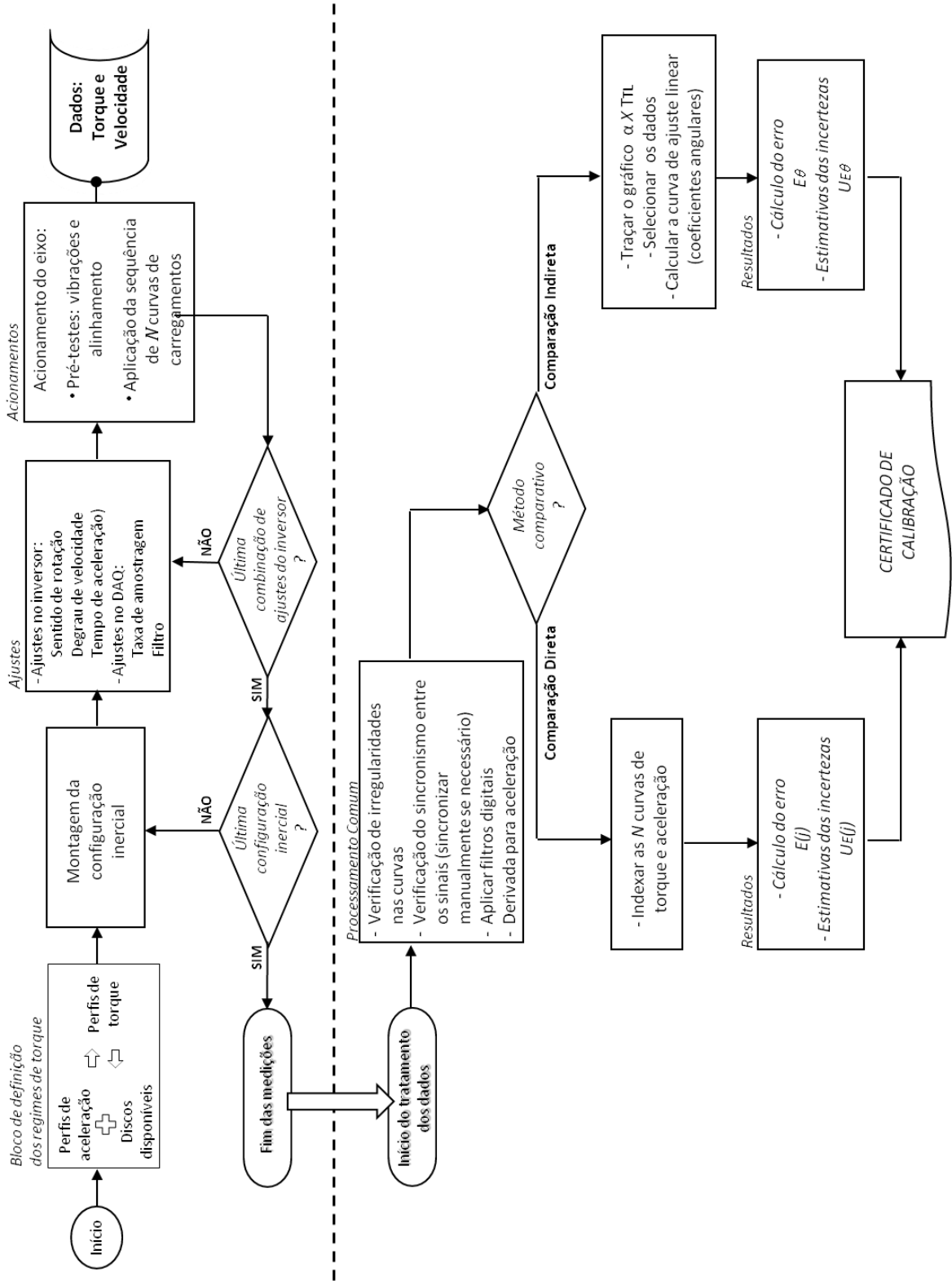
Parâmetro	GUM	GUM-WB	MMC-WB
T_{ir} / N.m	2,534	2,534	2,534
$u_{T_{ir}}$ / N.m	0,004602	0,004600	0,004600
$U_{T_{ir}}$	0,78%	0,36%	0,36%
T_{tl} / N.m	2,39756	2,39756	2,3976
$u_{T_{tl}}$ / N.m	0,00151	0,0016	0,0016
$U_{T_{tl}}$	0,12%	0,13%	0,13%
E / N.m	-0,136835922	-0,13684	-0,1368
u_E / N.m	0,004842903	4,86E-03	0,0049
U_E	15%	7%	7,09%

Tabela D.3 - Ponto com maior taxa negativa para o acionamento com D20.

Parâmetro	GUM	GUM-WB	MMC-WB
$T_{ir} / \text{N}\cdot\text{m}$	0,874	0,874	0,874
$u_{T_{ir}} / \text{N}\cdot\text{m}$	0,002041	0,002040	0,002000
$U_{T_{ir}}$	1,01%	0,47%	0,47%
$T_{tl} / \text{N}\cdot\text{m}$	0,87559	0,87559	0,8756
$u_{T_{tl}} / \text{N}\cdot\text{m}$	0,002333311	2,33E-03	0,0023
$U_{T_{tl}}$	0,69%	0,53%	0,54%
$E / \text{N}\cdot\text{m}$	0,001926	1,93E-03	0,0019
$u_E / \text{N}\cdot\text{m}$	0,0031	0,0031	0,0031
U_E	393%	320%	326%

APÊNDICE E

FLUXOGRAMA PARA A SEQUÊNCIA DE EXECUÇÃO DA CALIBRAÇÃO



APÊNDICE F

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE OS PADRÕES ESTÁTICOS

F.1. O Padrão Primário Estático do Lafor

Para demonstrar a complexidade de um sistema padrão utilizado sob a realização de um conceito físico simples, a Figura F.1 mostra o padrão primário de torque do Laboratório de Força do Inmetro (Lafor/Inmetro), cuja faixa de medição é de 20 N·m até 3000 N·m com uma incerteza expandida relativa de 0,01%.

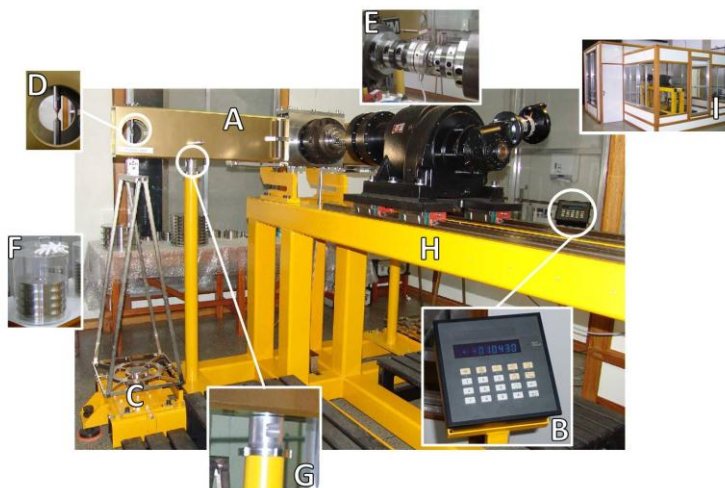


Figura F.1 - Padrão Primário de Torque do Lafor/Inmetro e os principais itens em destaque.

Na figura pode-se observar e destacar os seguintes itens:

- (A) O braço de alavanca com perfil reforçado de forma a evitar deformações críticas;
- (B) O sistema de contratorque para reposicionamento do braço de alavanca na posição de referência (horizontal);
- (C) O suporte para colocação das massas de referência com sistema de amortecimento;
- (D) Articulações instrumentadas (*hinges*) de acoplamento ao braço, respectivamente para a minimização de oscilações e a garantia da perpendicularidade da força em relação a braço;

- (E) O conjunto de acoplamentos flexíveis e hidráulicos que compõem um sistema auto ajustável de montagem e alinhamento do transdutor
- (F) Massas calibradas;
- (G) Sistema de apoio do braço para evitar sobre cargas no ponto de torque em calibração;
- (H) Estrutura reforçada para comportar todos os elementos e garantir o seu funcionamento homogeneamente por toda a faixa de torque;
- (I) Campânula de proteção para evitar influências diretas de variação de temperatura e fluxo de ar.

A Tabela F.1 mostra a relação de alguns desses sistemas e os respectivos INMs onde estão localizados.

Tabela F.1 - INMs com padrões primários de torque⁹.

<i>País</i>	<i>INM</i>	<i>Faixa de calibração</i>		<i>Incerteza de medição / %</i>
Alemanha	PTB	1 N·m	até 20000 N·m	0,002
Brasil	INMETRO	20 N·m	até 3000 N·m	0,01
França	LNE	1 N·m	até 2000 N·m	0,02
Índia	NPL/Índia	2 N·m	até 2000 N·m	0,01
Japão	NMIJ	5 N·m	até 1000 N·m	0,005
México	CENAM	200 N·m	até 2000 N·m	0,05
República Tcheca	CMI	10 N·m	até 1000 N·m	0,05
Suécia	METAS	10 N·m	até 1000 N·m	0,005

F.2. O Sistema Secundário por Comparação

Como exemplo de máquina deste sistema, a Figura F.2 mostra um sistema de calibração padrão secundário de torque do PTB na faixa de 100 N·m até 5000 N·m com incerteza de medição relativa de 0,01% com a configuração horizontal que utiliza um transdutor de transferência como valor de referência e realiza a calibração de torquímetros digitais de referência e outros padrões de trabalho. A variante destes sistema é a montagem na posição vertical, o que é mais coerente para menores faixas de torque entre 0,1 N·m até 10 N·m ($U = 0,02\%$) sendo utilizado para a calibração de pequenos transdutores de torque e torquímetros de referência.

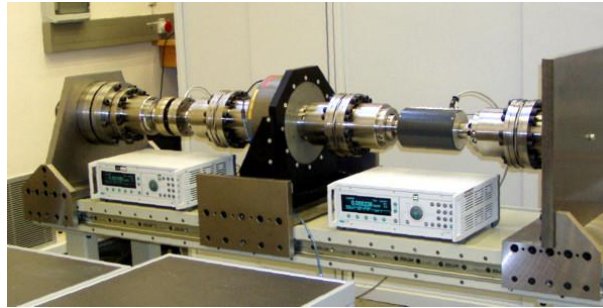


Figura F.2 - Sistema de Calibração por Comparação do PTB.

A seguir estão destacados alguns componentes principais desses sistemas de calibração por comparação:

- Transdutor de transferência usado como referência à calibração;
- Transdutor em calibração;
- Conjunto de acoplamentos flexíveis e hidráulicos que compõem um sistema auto ajustável de montagem e alinhamento do transdutor;
- Mancal de apoio entre os transdutores com mínimo atrito, geralmente de princípio aeroestático ou de rolamento;
- Sistema de aplicação do torque, geralmente um motor acoplado a um redutor capaz de manter o torque constante no eixo de medição;
- Anteparo para fixação do eixo de medição;
- Amplificadores digitais para aquisição em ambos sensores;

APÊNDICE G

SETUP SUGERIDO PARA BANCADAS EM ESTUDOS FUTUROS

Baseado nos resultados obtidos da pesquisa, é possível redesenhar o projeto da bancada inserindo alguns componentes e alterando outros de forma que fique um sistema mais confiável e versátil, dedicado aos experimentos na metrologia de torque. A Figura G.1 mostra algumas dessas sugestões.

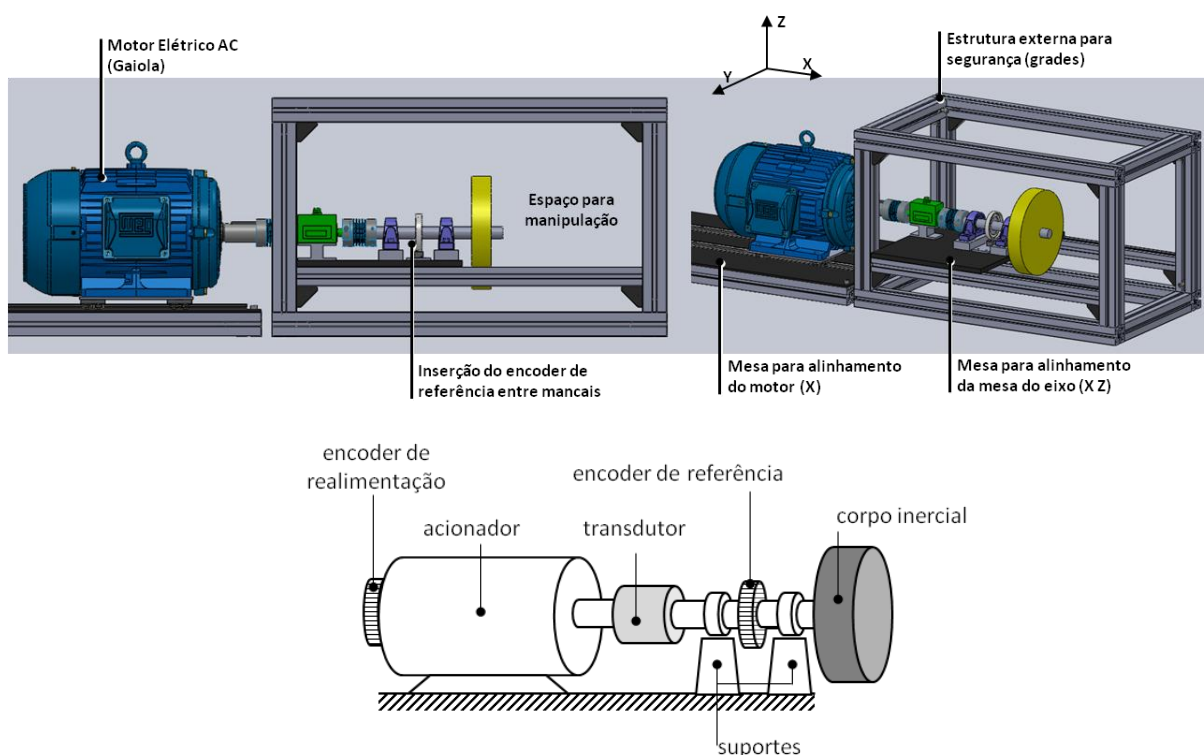


Figura G.1 - Sistema Sugerido para as Bancadas em Estudos Futuros.

A inserção de um *encoder* de referência, de melhor qualidade que aquele do próprio transdutor, traz uma melhor confiabilidade metrológica ao sistema pois este estaria dedicado às medições de referência e diretamente conectado ao eixo de medição. A comparação entre os valores de velocidade do *encoder* de referência e do *encoder* embutido no transdutor poderá servir como uma forma interessante de verificação/calibração deste último.

A utilização do espaço entre os mancais é uma solução interessante a partir do momento que não é interessante que o *encoder* fique acessível ou que sofra perturbações durante a manipulação do sistema por parte do operador.

O motor elétrico AC, tipo gaiola de esquilo, é mantido como componente acionador, porém é interessante que este esteja montado sobre uma mesa que permita um grau de liberdade tal que facilite e oriente no alinhamento inicial com o eixo de medição. Após esse alinhamento, o motor pode ser travado e liberado para movimentação somente na direção 'X', por guias, com aproximação ou afastamento do eixo.

Da mesma forma, uma outra mesa para fixação e alinhamento dos mancais é interessante pois permite o deslocamento em 'X' e 'Z' da mesa de forma a encontrar o centro do eixo do motor.

A estrutura externa deve ter um sistema de proteção para a operação de acionamento. Um sistema de grades móveis seria suficiente para tal, desde que permita ao operador manipular o disco e demais componentes mecânicos da mesa e do eixo.

Embora não identificados na Figura G.1, alguns outros elementos/componentes podem servir ao sistema, seja na função de monitoramento e segurança, ou na operação propriamente dita e estão elencados a seguir:

- Dispositivo capacitivo para monitoramento de vibrações;
- Termopares distribuídos no eixo;
- Encoder de realimentação para controle da velocidade;
- Transdutor de torque de redundância, *a priori* do eixo de medição;
- Mancais aeroestáticos em substituição aos mancais de rolamento

Uma configuração com o eixo de acionamento e medição na vertical poderá ser testada sob o propósito de se minimizar as componentes de atrito, desalinhamento e cargas parasitas originadas pelos pesos dos próprios componentes.

A evolução dos sistemas primários, partindo de um conceito físico simples e alcançando máquinas que representam o estado da arte da grandeza, mostra bem como deverá ser a "evolução natural" de um novo sistema metrológico. É importante portanto que as melhorias estejam sempre bem embasadas no histórico e objetivo do sistema, de forma que acompanhem também o desenvolvimento e variação dos métodos de medição ali realizáveis.