



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

UM ESTUDO SOBRE A CADEIA DE RASTREABILIDADE DAS MEDIÇÕES DE TORQUE

Tarso Barretto Rodrigues Nogueira¹
Luis Alberto Breda Mascarenhas¹
Herman Augusto Lepikson²

¹SENAI CIMATEC

²Universidade Federal da Bahia

***Resumo:** A preocupação com a confiabilidade dos resultados de medições surgiu efetivamente na década de 1970. Nos anos seguintes, estudos profundos sobre o tema estabeleceram métodos e permitiram criar em todo o mundo uma nova cultura de metrologia. O desenvolvimento de uma cadeia de rastreabilidade das medições capaz de vincular a unidade de medida e a incerteza do resultado da medição realizada no chão de fábrica a um padrão primário reconhecido universalmente, está fortemente relacionada à busca pela confiabilidade das medições. A grandeza metrológica torque tem forte presença na indústria, embora tenha pouca popularidade para o público em geral. O torque se tornou uma grandeza prioritária em setores diversos da sociedade, desde a medicina até a indústria automobilística, tanto na medição estática quanto na dinâmica. Além da crescente importância para a produção, o torque passa por outras significativas mudanças de caráter metrológico. A sua faixa de emprego vem se ampliando e o nível de incerteza do resultado aceitável diminuindo expressivamente. Esforços vem sendo conduzidos para o desenvolvimento de padrões primários que possam atender aos requisitos atuais da cadeia de rastreabilidade, principalmente no que se refere ao torque estático. A proposta deste trabalho é apresentar um estudo da atual situação da cadeia de rastreabilidade do torque, avaliar os seus principais pontos fracos e revelar os últimos progressos no estabelecimento faixas de operação mais amplas e menores incertezas de medição na reprodução da grandeza, particularmente no seu emprego em medições dinâmicas.*

***Palavras-chave:** torque, rastreabilidade, medição dinâmica.*

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a confiabilidade dos resultados de medições, sejam destinadas à calibração de instrumentos, sejam reservadas aos ensaios ou medições de processos industriais, efetivamente surgiu na década de 1970. Nos anos seguintes, estudos profundos sobre o tema estabeleceram métodos e permitiram criar em todo o mundo uma nova cultura de metrologia. A consciência de que nenhum resultado experimental é livre de erros e de que sempre haverá alguma incerteza relacionada a ele foi uma conquista importante para a engenharia na década de 1990. Saber que um resultado contém certo grau de incerteza e quantificá-la adequadamente aprimorou o conhecimento sobre o comportamento dos processos de medição e apurou a percepção do real significado do resultado de uma medição. Isto permitiu criar uma base factual à tomada de decisões, principalmente nos setores intensivos em tecnologia. Na indústria, antes das modernas discussões sobre a incerteza das medições, as variáveis de processos industriais eram vistas no limite do seu próprio comportamento. Os resultados numéricos produzidos por sistemas de medição não eram profundamente discutidos e uma avaliação de confiabilidade dos processos de medição geralmente descartada, por se achar desnecessária.

O desenvolvimento de uma cadeia de rastreabilidade das medições eficaz, isto é, capaz de vincular a unidade de medida e a incerteza do resultado da medição realizada no chão de fábrica a um padrão primário (padrão designado ou amplamente reconhecido como tendo as mais altas qualidades metrológicas e cujo valor é aceito sem referência a outros padrões de mesma grandeza, INMETRO, 2009), está fortemente relacionada à busca pela confiabilidade das medições. A Convenção Geral de Pesos e Medidas, realizada em 1960, foi um marco no estabelecimento do Sistema Internacional de Unidades e uma largada na corrida pela busca de melhores padrões capazes de realizar a unidade de medida por meio de efeitos físicos, assim permitindo a diminuição dos níveis de incerteza no topo da cadeia de rastreabilidade.

Considerando especificamente o torque, ele é classificado como uma grandeza derivada. O torque deriva de uma grandeza de base (comprimento) e de outra grandeza derivada (força). Fundamentalmente, o torque deriva de três grandezas de base: comprimento, massa e tempo (Peschel, 2007). Na prática, conceitua-se o torque como derivado das grandezas comprimento e força (Bitencourt et al., 2008).

Krimmel (2006) recorda que a evolução na medição do torque começou no ano de 1678. Neste ano, Robert Hooke descreveu a sua conhecida lei, que descreve a proporcionalidade entre a extensão do material e a tensão associada. Mesmo nos meios científicos e industriais, ao torque sempre foi destinada uma atenção secundária, já que havia a necessidade de trabalhar prioritariamente com as grandezas de base e outras derivadas tidas como de maior importância. Por outro lado, o torque é hoje uma grandeza de forte presença na indústria. A grandeza se tornou fundamental em setores diversos da tecnologia, desde a engenharia biomédica até a indústria automobilística. Kang & Eltawil (2007) destacam que as grandezas força, massa e torque não somente estão intimamente ligadas à indústria, mas são essenciais para a pesquisa e a investigação no desenvolvimento de novas tecnologias, o que é confirmado por Park et al. (2007), que apontam o aprimoramento da qualidade e a inovação no desenvolvimento de produtos como elementos direcionados pelos avanços obtidos na medição do torque. Krimmel (2006) lista uma série de aplicações atuais para os sensores de torque, desde teste de desempenho de motores elétricos e de combustão interna, até o controle de parâmetros de operação, como no caso do torque aplicado no aperto de parafusos ou ainda no monitoramento do desempenho do rotor de um helicóptero.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1856 Thomson descreve a correlação entre a deformação mecânica de um fio e a sua resistividade (Krimmel, 2006). Apenas em 1941 o primeiro *strain gage* (medidor de deformação mecânica) de uso industrial estaria disponível. O uso do *strain gage* (SG) montados em lâminas e associado a um artefato capaz de sofrer deformações elásticas (fixado sobre a sua superfície) permitiu a criação de medidores de torque de uso prático por volta de 1952. Krimmel (2006) recorda que ainda no início dos anos 1940 era possível utilizar medidores de torque empregando outros princípios de medição (p. ex.: de natureza indutiva), mas rapidamente o SG se tornou o preponderante no mercado. Em relação ao futuro, como comenta o autor, o SG será a principal solução para os sensores de torque durante muito tempo, principalmente em função dos aprimoramentos da eletrônica (miniaturização e melhoria da estabilidade). O progresso contínuo das técnicas de amplificação de sinais elétricos permite hoje condicionar sinais de muito baixa energia e com baixíssimos erros de medição. O futuro pertence, ainda segundo o autor, aos sensores inteligentes, capazes de tratar e manter dados de medições armazenados na memória e transmiti-los diretamente e automaticamente para fins de controle de qualidade.

Por falar em controle da qualidade, qualquer processo industrial moderno tem estabelecidos limites ou tolerâncias para suas variáveis. Documentos técnicos, tais como procedimentos de ensaios e instruções de montagem, frequentemente especificam tolerâncias para valores de torque, seja para a montagem de uma estrutura metálica, seja no momento de se testar o desempenho de um sistema de transmissão veicular. Portanto, o controle dos valores de torque é fundamental e, ressaltando Peschel (2007), a falta de confiabilidade dos valores pode levar a resultados desastrosos. O autor ainda destaca que na Alemanha, para eliminar as óbvias deficiências da cadeia de rastreabilidade da calibração dos sistemas de medição industriais de torque, foi criado em 1993 o laboratório de medição de torque do *Physikalisch Technische Bundesanstalt* (PTB), instituto nacional de metrologia do país. Tal ação demonstra a crescente importância do torque nos processos industriais e mostra a preocupação dos países desenvolvidos com o topo da cadeia de rastreabilidade.

Além da crescente importância para a produção, o torque passa por outras significativas mudanças de caráter estritamente metrológico. A sua faixa de emprego vem se ampliando nas duas extremidades. Com a miniaturização característica da indústria de precisão moderna, pequenos valores de torque são requeridos, o que exige sistemas de medição capazes de medir valores cada vez menores a incertezas igualmente diminutas. No outro extremo, materiais mais resistentes, maiores equipamentos (p. ex.: motores elétricos mais potentes) necessitam de sensores de torque com faixas de operação mais elevadas. Tudo isto aumenta a pressão sobre a cadeia de rastreabilidade da grandeza, que precisa se adaptar a uma faixa de medição mais ampla e a limites de incerteza de medição menores. Além de exigir melhores padrões de trabalho nos patamares inferiores da cadeia de rastreabilidade, os crescentes requisitos da indústria, afetam, por conseguinte, as especificações dos padrões primários.

Segundo Freitas (2006), na última década foi dado um grande passo na metrologia de torque. Uma das principais tarefas dos Institutos Nacionais de Metrologia (INMs), além de investir na melhoria dos seus padrões primários, é realizar comparações entre si. Tais eventos são chamados de comparações-chave. Em 2004, nas reuniões dos grupos de trabalho de força do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) e Melhor Capacidade de Medição (MCM), tomou-se a decisão de realizar a primeira comparação-chave na grandeza torque. Então, foi preciso realizar uma pesquisa nos INMs, para compatibilizar as diversas faixas nominais dos padrões de referência de torque existentes nos laboratórios participantes. Ainda segundo o autor, o resultado final da comparação obteve uma boa concordância nas medidas efetuadas, onde se pôde concluir que a disseminação da unidade da grandeza torque tem uma rastreabilidade adequada. Um dos resultados do estudo foi a constatação das baixas incertezas declaradas pelos participantes. O erro normalizado (Eq 1) de alguns laboratórios esteve acima de 1, o que não foi interpretado inicialmente como problema, mas a oportunidade de se discutir e reavaliar a melhor capacidade de medição dos vários laboratórios envolvidos.

Na Figura 1 podem-se identificar duas perspectivas diferentes da cadeia de rastreabilidade das medições de torque. Em ambas, é possível identificar como o valor indicado em um instrumento (p. ex.: torquímetro ou transdutores de torque) de uso geral encontra-se rastreado a um padrão consensualmente aceito como a referência nacional. No diagrama da esquerda, é possível verificar os vários níveis de instrumentos e padrões empregados na cadeia. Já no

diagrama da direita, é possível observar os diferentes níveis sob o ponto de vista específico da estrutura do sistema brasileiro de metrologia.

$$En = \left| \frac{V_R - V_I}{\sqrt{U_R^2 + U_I^2}} \right| \quad (1)$$

onde V_R é o valor de referência, V_I é o valor do laboratório I, U_R é a incerteza de medição do laboratório de referência e U_I a incerteza do laboratório I. Para que os resultados sejam considerados compatíveis, o valor do En deve ser menor ou igual a 1 (ABNT, 1999).

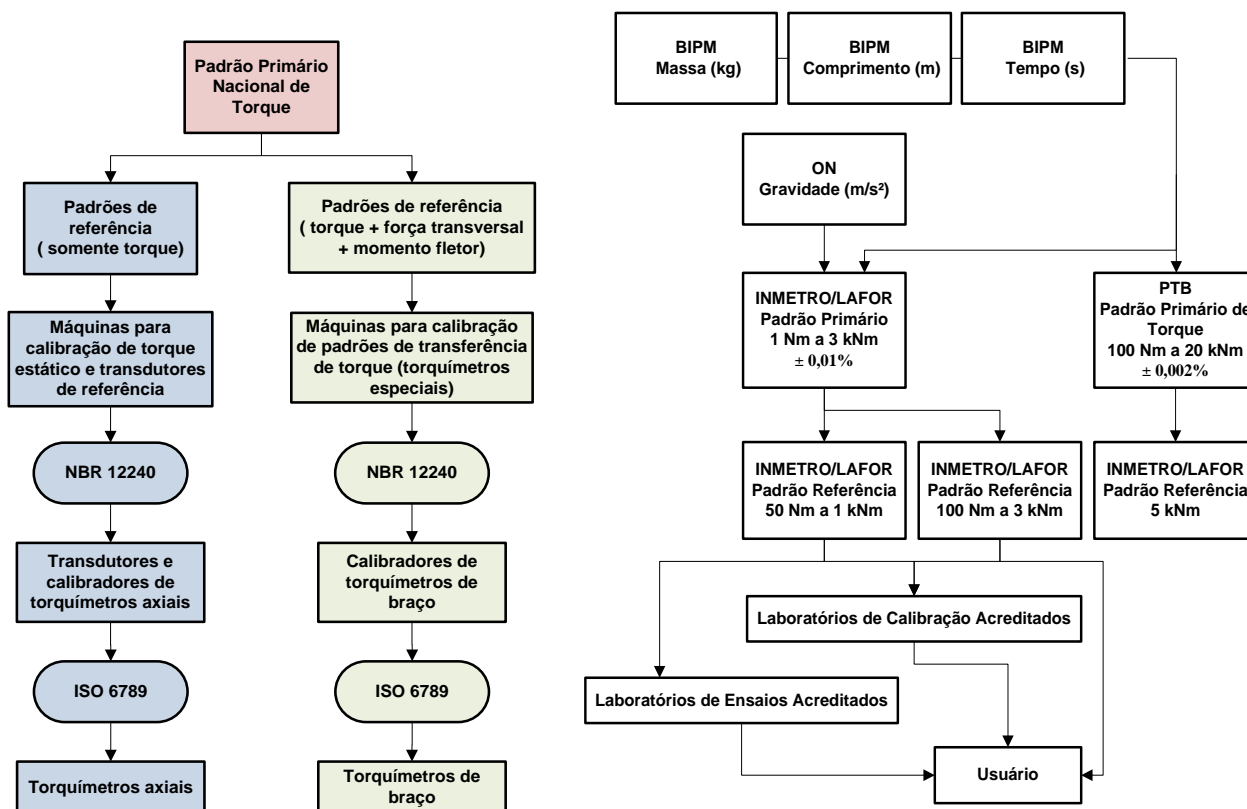


Figura 1. Cadeia de rastreabilidade do torque. Adaptado de Machado (2009).

No final de 2005, uma nova versão da norma DIN 51309 (Calibração de Torque) foi publicada. Röske (2007) realizou um detalhado estudo da norma, inclusive apresentando dois exemplos de calibrações de transdutores de torque. É importante ressaltar que não houve mudanças no procedimento de calibração em si. As séries de medições, número de repetições e posições de montagem não foram alterados. Por outro lado, ocorreram alterações profundas no tratamento dos dados. Agora o cálculo do resultado leva em conta as medições em valores crescentes de torque e também as medições para valores crescentes e decrescentes, considerando-os dois casos distintos. O primeiro caso é aplicado para medições de considerável exatidão, como em máquinas padrão de torque. O segundo caso aplica-se ao uso geral e leva em conta a histerese como um fator sistemático e não aleatório, como na versão anterior da norma. Outra mudança importante, segundo Röske (2007), foi no uso de curvas de compensação de erros. Na versão anterior, eram usadas curvas de 1°, 2° e 3° graus. Porém, a prática mostrou que aproximações lineares ou cúbicas eram suficientes, não havendo necessidade de regressões quadráticas. Na maioria das aplicações gerais, uma simples regressão linear se mostrou suficiente, pois os resíduos da regressão são muito menores do que a histerese observada, conclui o autor. Röske (2007) resalta ainda o criterioso detalhamento das contribuições à incerteza de medição da nova versão, todas consideradas no seu valor absoluto (reprodutividade, repetitividade, desvio residual do zero, histerese, resíduo da curva de regressão e desvio da indicação para transdutores com escala definida). Ele ainda compara a nova norma com a versão europeia EA-10/14, de 2000, revelando que a DIN apresenta-se mais completa na sua atual versão.

Pratt et al. (2002) já haviam elaborado um trabalho semelhante, comparando a norma britânica BS 7882, com suas correlatas DIN 51309 e EA-10/14. O papel da norma BS é o mesmo das demais, ou seja, descrever o método de calibração, o tratamento dos dados e a classificação dos instrumentos de medição (para medição de torque estático). Pratt et al. (2002) consideram a DIN 51309 e a BS 7882 as únicas normas publicadas que tratam especificamente do método de calibração de medidores de torque, já que a EA-10/14 é uma recomendação, baseada fundamentalmente na norma DIN 51309. É importante ressaltar, que a norma brasileira equivalente, não tratada por Pratt et al. (2002) e designada NBR 12240, de 2000, possui a mesma estrutura e pode-se afirmar que se baseou nas suas equivalentes

européias. No que se refere especificamente ao cálculo dos resultados, em especial da incerteza de medição, a DIN 51309 de 2005 apresenta um tratamento mais condizente com as orientações do GUM (Guia para Expressão da Incerteza de Medição, 1995).

Os níveis superiores da cadeia de rastreabilidade, em especial os padrões primários, são hoje tema de diversos estudos, tanto na medição estática, quanto na dinâmica. Segundo Bitencourt et al. (2008), o padrão primário de torque é chamado de *Torque Standard Machine* (TSM), também conhecida como *Deadweight Torque Machine*, máquina de peso morto para torque (Park et al., 2007). Uma TSM é um dispositivo padrão primário capaz de realizar torque estático com as mais elevadas características metroológicas, cujos valores e incerteza de medição são estabelecidos sem qualquer relação com outro padrão da mesma grandeza, além da força e do comprimento (Bitencourt et al., 2008). A TSM é utilizada na calibração dos padrões de transferência, assim como para pesquisa. Park et al. (2007) relatam que o princípio capaz de conferir as melhores características metroológicas à TSM é o peso morto. Este princípio usa uma balança com massas padrão, conforme ilustrado na Figura 2, cujo movimento pode ser medido por um dispositivo apropriado.

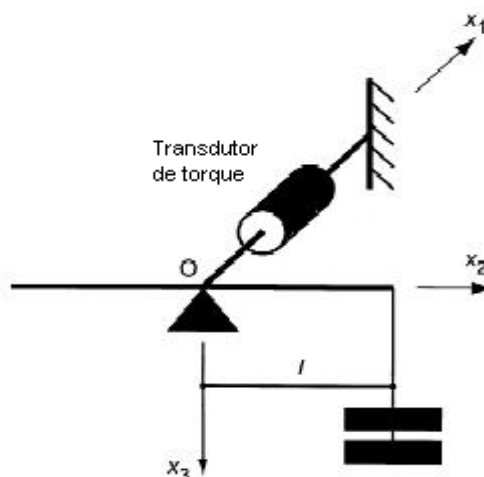


Figura 2. Princípio do peso morto. Adaptado de TU Ilmenau, UFSC, UFBA (2008).

Na Figura 2 tem-se, portanto, Eq. 2 :

$$F_1 = F_2 = 0, M_2 = M_3 = 0, M_1 = F_3 \cdot l = T_N \quad (2)$$

Diversas variantes do princípio acima são realizadas com pequenas alterações, como tipos de mancais empregados, mudanças no braço de alavanca e na configuração da junção entre o braço e o conjunto de massas (Bitencourt et al., 2008). Os autores apresentam ainda os resultados da fase informacional do projeto (requisitos do projeto e estrutura funcional) de um padrão estático de torque nominal de 1 Nm, com incerteza relativa expandida de 10^{-5} .

O *Korea Research Institute of Standards and Science* (KRISS), instituto nacional de metrologia da Coreia, desenvolveu uma TSM com incerteza de medição relativa expandida de $5 \cdot 10^{-5}$ ($k=2$). O equipamento opera a 2 kNm, capaz de gerar um torque mínimo de 10 Nm. Segundo Park et al. (2007), quando calibrando um transdutor de torque, o primeiro ponto de calibração na sua faixa de operação deve ser a 10% da capacidade. Portanto, a TSM do KRISS somente é capaz de realizar calibrações de transdutores de 100 Nm e acima. Com o desenvolvimento da indústria de precisão, a demanda por calibração de transdutores de torque inferiores a 100 Nm tem aumentado. Recentemente, segundo Park et al. (2007), o KRISS desenvolveu uma máquina de peso morto de 100 Nm, capaz de operar com transdutores de até 1 Nm, para uma incerteza de medição relativa expandida de $5 \cdot 10^{-4}$ ($k=2$). Os melhores resultados na realização de pequenos torques foram obtidos com a TSM do PTB, da Alemanha. A faixa de trabalho vai de 1 mNm a 1 Nm, com resolução de 1 mNm e incerteza de medição relativa expandida de $1 \cdot 10^{-4}$ ($k=2$). Como confirma Peschel (1997), este nível de incerteza ainda não atende às necessidades da indústria. Park et al. (2007) ressaltam que até o momento pouco se pesquisou sobre a realização de pequenos torques com baixas incerteza de medição.

Na prática, existem duas perspectivas para medição do torque, com aplicações totalmente distintas. Bitencourt et al. (2008) tratam do torque estático, também denominado de reação, grandeza fundamental para a indústria nas atividades de montagem e ajuste, principalmente de dispositivos de precisão, mas também na fixação de implantes, como próteses ortopédicas e dentárias. O torque é medido unicamente em um estado onde ele é constante no tempo e o transdutor de torque é montado numa máquina de calibração com uma configuração estática, isto é, sem rotação (Wegener & Bruns, 2009). O torque dinâmico, por outro lado, é requerido onde se precisa mensurar e controlar movimentos rotativos, como por exemplo, na avaliação de motores de combustão interna, de caixas de redução e transmissões.

Fujii et al. (1999) relatam que os transdutores de torque empregados para medição dinâmica (p. ex.: em motores elétricos) são calibrados em condições estáticas, isto é, torque estático é aplicado no transdutor durante o processo de calibração. Porém, no uso prático dos transdutores em aplicações dinâmicas, o valor do torque varia. Além disso,

transdutores com uma frequência de 2 kHz e incerteza relativa de 2% estão hoje disponíveis comercialmente e são calibrados somente com torque estático. Segundo Wegener & Bruns (2009), o desempenho dinâmico de transdutores de força quando carregados com forças periódicas ou sob impacto são consideravelmente diferentes dos resultados obtidos na calibração estática. Isto significa que a incerteza resultante das medições dinâmicas é elevada e pode até estar sendo avaliada de forma incompleta. Por outro lado, segundo Fujii et al. (1999), um método de calibração dinâmica do torque com baixa incerteza de medição é viável, empregando a lei de conservação do momento angular. Sua estimativa de incerteza inicial chegou ao nível de 10^{-3} ($k=2$).

Bitencourt et al. (2008) ressaltam que não há até o momento um padrão primário para o torque dinâmico. Há apenas, ainda segundo os autores, pesquisas iniciais sobre a realização do torque dinâmico empregando-se um pêndulo de torção. O princípio é descrito por Wegener & Bruns (2009) a partir das considerações sobre a cadeia de rastreabilidade do torque dinâmico feitas por Bruns (2003). Eles detalham o princípio da calibração dinâmica de torque por meio do momento de inércia. O torque que age sobre um das extremidades do transdutor pode ser calculado a partir da reação ao momento de inércia que ocorre sobre o outro lado, e sua correspondente aceleração angular, conforme Eq. 3.

$$T(t) = J \cdot \ddot{\theta}(t) \quad (3)$$

O aspecto básico do dispositivo protótipo para calibração dinâmica de torque proposto pelo PTB pode ser visto na Figura 3.

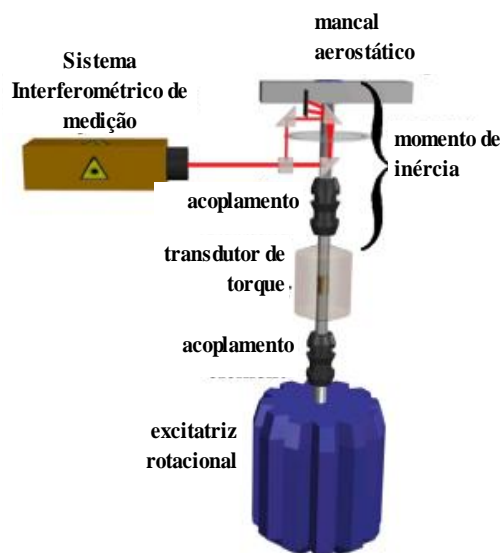


Figura 3. Princípio de operação do dispositivo protótipo para calibração primária de torque. Adaptado de Bruns (2003).

De modo a permitir a calibração do transdutor com cargas cíclicas, este deve ser montado num dispositivo rotacional no seu lado de fixação. Um momento de inércia suficientemente grande é aplicado ao lado de medição do transdutor. O momento de inércia, neste caso, é uma distribuição de massa, montada assimetricamente em relação ao eixo do sensor. Portanto, para Wegener & Bruns (2009), por meio da medição criteriosa da aceleração angular e do momento de inércia, um resultado preciso e rastreável é possível pela equação anterior.

Na proposta original do PTB (Bruns, 2003), o deslocamento angular é medido com boa exatidão por meio do interferômetro *doppler* a laser em conjunto com um *grid* impresso em um disco óptico. O momento de inércia é dado pelo conjunto mancal aerostático, flange do transdutor, acoplamento e disco óptico. Cabe destacar que este trabalho tem como principal objetivo avaliar a viabilidade do emprego do momento de inércia e do deslocamento angular para a rastreabilidade das medições dos transdutores de torque dinâmicos, limitando-se, portanto, a confirmação da viabilidade do conceito básico associado à calibração de torque dinâmico.

Bitencourt et al. (2008) relatam ainda uma outra variante construtiva para realização do torque dinâmico. Nesta, emprega-se um volante rotativo, conforme pode ser observado na Figura 4. Neste caso, o torque é determinado como na Eq. 4.

$$\int_{t_1}^{t_2} T dt + J(\omega_2 - \omega_1) = 0 \quad (4)$$

onde t_1 , t_2 , ω_1 e ω_2 são, respectivamente, tempo e velocidades angulares, antes e depois do acoplamento da embreagem (Figura 4).

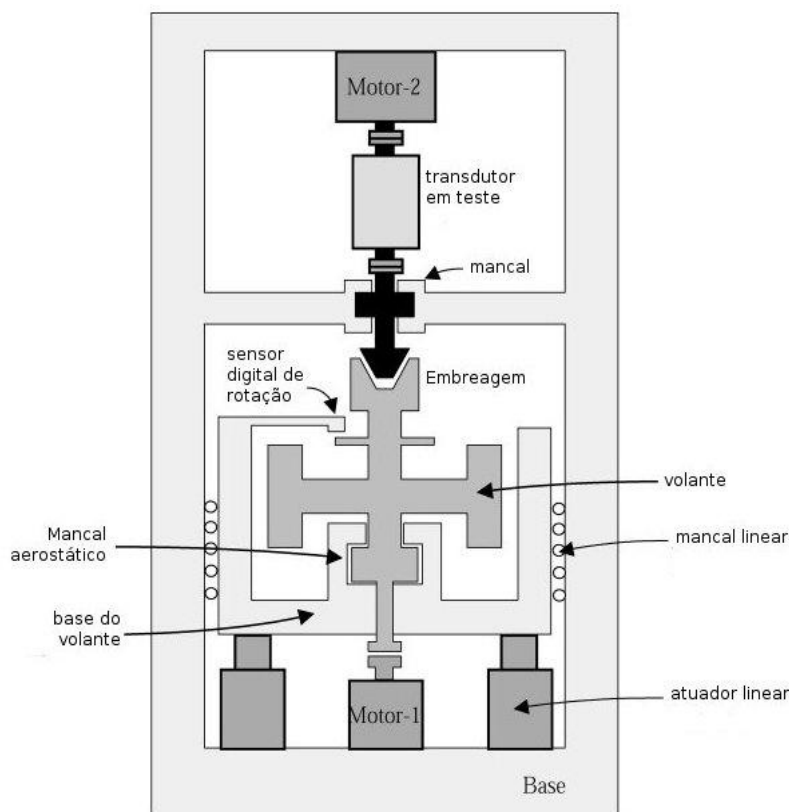


Figura 4. Realização do torque dinâmico por meio de volante. Adaptado de Bitencourt et al. (2008)

Certamente, para um padrão primário, o nível adequado de incerteza de medição é algo de importância primordial. Exemplos de requisitos específicos dos padrões já existentes foram citados em parágrafos acima e uma visão geral sobre o tema precisa ser aqui discorrida. Um Guia destinado à avaliação da incerteza de medição foi criado na década de 1990. Segundo Moscati et al. (2004), o Guia se baseia na propagação de incertezas (desvios padrão) sobre o modelo matemático da medição. Bich et al. (2006) fazem um histórico da evolução do *Guide to The Expression of The Uncertainty in Measurement* (GUM), BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML (1995) e lembra que suas origens remontam a uma recomendação da ISO, a INC-1 (*Expression of Experimental Uncertainties*), de 1980. O trabalho foi uma resposta do BIPM a uma encomenda do CIPM, que aprovou a recomendação em 1981 e a revalidou em 1986. A responsabilidade por desenvolver um guia específico sobre a expressão da incerteza de medição coube então a um grupo de trabalho técnico de metrologia (TAG4) da ISO, reforçado por pessoal especializado de outras seis organizações (BIPM, IEC, IFCC, IUPAC, IUPAP e OIPM). O documento final ficou pronto em 1993, o que seria a primeira versão do GUM, e reimpresso em 1995 com pequenas correções.

Em 1997, recorda Bich et al. (2006), um novo comitê é criado pelo BIPM, com a participação das organizações que participaram da elaboração do GUM e do *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology* (VIM). O novo grupo, denominado *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM) assumiu as responsabilidades do ISO TAG4 sobre o GUM e o VIM. Em 1998, a união das sete organizações internacionais resultou na criação do *International Accreditation Co-operation* (ILAC). Um dos primeiros documentos elaborados pelo ILAC foi o *Expression of The Uncertainty of Measurement in Calibration*, conhecido como Guia EA4/02. O trabalho é um extrato do GUM, resumindo-o às aplicações em processos de calibração de sistemas de medição em geral, e traz ainda diversos exemplos específicos.

O JCGM foi estruturado em dois comitês. Um dedicado ao desenvolvimento e disseminação do GUM e outro ao VIM. Uma das funções do comitê responsável pelo GUM é a de estruturar suplementos ao documento original. Estes sim reportam aprimoramentos significativos na sistemática original proposta em 1993. Dois exemplos importantes de suplementos são o *Supplement 1 (Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method)* e o *Supplement 3 (Modeling)*. O primeiro será objeto de futura discussão neste trabalho.

Evidentemente, há outros documentos que tratam da avaliação da incerteza de medição. Alguns foram publicados por laboratórios nacionais de metrologia, como o documento do *National Institute of Standards and Technology* (NIST), dos EEUU, outros por organizações de acreditação, como o *United Kingdom Accreditation Service* (UKAS). Há também guias que atendem às especificidades setoriais, como o EURACHEM, aplicado em análises químicas. No Brasil, está disponível uma tradução do GUM, capitaneada pelo INMETRO e ABNT, com exemplos especificamente criados para a versão brasileira. Trata-se do Guia para Expressão da Incerteza de Medição (INMETRO & ABNT, 2003), hoje na sua 3ª edição.

Donatelli & Konrath (2005) revelam que o modelo de propagação de incertezas possui algumas limitações de aplicabilidade, como a exigência da linearidade do modelo e a normalidade da distribuição da variável aleatória. Tais

restrições fomentaram desde a década de 1990 a busca por métodos de avaliação da incerteza de medição de aplicação mais ampla. Donatelli & Konrath (2005), propõem a utilização de um método de propagação de distribuições, empregando a simulação numérica (Monte Carlo) como ferramenta capaz de complementar o método clássico, obtendo-se um modelo mais abrangente. Eles não apenas apresentam o método Monte Carlo aplicado à avaliação da incerteza de medição, mas realizam uma cuidadosa comparação entre este e o modelo clássico de propagação de incertezas. Em 2006, Cox & Siebert (2006) expandem a proposta de uso do método Monte Carlo, chegando à avaliação da incerteza expandida.

Hall (2008) faz uma comparação entre os dois principais métodos de avaliação da incerteza hoje em voga (métodos GUM e Monte Carlo), enquanto que Bich et al. (2006) e Kacker et al. (2007) discorrem sobre a evolução do Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM) e acerca da evolução dos métodos de cálculo sob o ponto de vista matemático e estatístico. Em todos os casos, exemplos de aplicações específicas são citados.

Kuselman (2008) apresenta uma abordagem diferente na avaliação da incerteza de medição, porquanto associa o método *Design of Experiments* (DOE), Projeto de Experimentos, com o tema. Ele criou uma aplicação do DOE para utilização na avaliação da incerteza dos resultados na caracterização da composição química de materiais (especificamente drogas, alimentos, materiais biológicos em geral).

É importante observar que não basta selecionar um método de avaliação da incerteza de medição baseando-se nas características do que se quer estudar, mas é preciso estabelecer um modelo matemático adequado que represente os processos de medição envolvidos. Está justamente aí a maior dificuldade em qualquer processo de avaliação da incerteza de medição. Moscati et al. (2004) mostram que a definição de um modelo matemático adequado e a sua utilização criteriosa no método de avaliação específico são fundamentais para a obtenção de resultados confiáveis. Na literatura, são usuais os trabalhos que se dedicam a estabelecer modelos matemáticos específicos para determinadas aplicações, que geralmente envolvem também estudos experimentais e o cálculo da incerteza expandida em determinadas condições. São exemplos: Chui & Zucchini (2001), com seu estudo de caso para avaliação da incerteza do resultado na determinação do cádmio por espectrofotometria de absorção atômica com chama; Castanho et al. (2003) com seu estudo sobre a validação da calibração de termopares pelo método da ponte (pontos do ouro e do paládio); Orrego et al. (2000) com seu trabalho intitulado Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: considerações gerais.

Como não poderia deixar de ser, estudos específicos para medições de torque foram elaborados. Merlo (2001) estudou um modelo matemático para avaliação da incerteza de medição associada à operação das TSMs (torque estático). Para ele, atingir o patamar de 10^{-5} é viável, desde que se tenha especial atenção com algumas fontes de erros importantes. Primeiramente, a combinação de massa e gravidade gera a força e aí estão duas fontes de erros relevantes, a medição da gravidade local e os valores efetivos das massas padrão empregadas. O conjunto de massas está imerso em um meio fluido (ar). Portanto, o empuxo do ar e a variação de sua densidade representam também fontes de erros consideráveis. O comprimento do braço de alavanca é outra fonte de erro, mas a incerteza depende da medição tridimensional, pois o eixo do torque precisa ser visto numa perspectiva vetorial. Por fim, o efeito da fricção foi também levada em consideração. Merlo (2001) conclui que incerteza na medição do comprimento do braço de alavanca é a maior contribuição à incerteza combinada. O efeito indesejado da fricção estática pode também ter forte efeito negativo no desempenho metrológico, principalmente nas faixas inferiores de operação.

Wegener & Andrae (2007) estudam a incerteza na medição de torques dinâmicos. O objetivo do trabalho é levantar as fontes de erros na medição de torques durante ensaios de desempenho de máquinas rotativas (tipicamente motores de combustão interna e transmissões). O ensaio precisa determinar o torque gerado (ou dissipado) em condições específicas de operação. As mais importantes contribuições (fontes de erros), segundo Wegener & Andrae (2007), são oriundas da variação da sensibilidade característica do transdutor de torque e do efeito da temperatura na variação de sensibilidade do transdutor. Também a linearidade e histerese foram relevantes nesse estudo.

3. ANÁLISE E AVALIAÇÃO

Na literatura, há poucos trabalhos relacionados à cadeia de rastreabilidade específica do torque dinâmico, como as pesquisas de Wegener & Andrae (2007) e Wegener & Bruns (2009), particularmente no que se refere aos padrões primários. Wegener & Andrae (2007) se dedicam a estudar a cadeia de rastreabilidade do torque dinâmico, o modelo de incerteza de medição para um transdutor dinâmico e métodos para sua redução, tudo sob o ponto de vista do uso industrial. Já Wegener & Bruns (2009), aprofundam a investigação da cadeia de rastreabilidade do torque dinâmico e apresentam um princípio de operação de um dispositivo protótipo calibrador primário.

Na realidade, a cadeia de rastreabilidade do torque dinâmico deveria ser considerada independentemente da estática, correlacionada fundamentalmente no que se refere à definição fundamental da grandeza. Pelo que foi visto neste texto, a íntima relação entre as duas cadeias ainda acontece por conta das deficiências nas sistemáticas de calibração do torque dinâmico, assim como na definição de padrões primários adequados.

Avaliando-se a situação atual do desenvolvimento de padrões primários de torque estático, especificamente na perspectiva do trabalho de Bitencourt et al. (2008), e as pesquisas sobre os métodos de incerteza de medição e modelos matemáticos relacionados e ainda comparando-os à situação da medição de torque dinâmico, pode-se concluir que a maior lacuna no estudo do torque encontra-se justamente nos estudos sobre calibração em condição dinâmica, principalmente nos níveis superiores da cadeia de rastreabilidade. Urge que este vazio seja preenchido nos próximos anos. Isto em função de duas questões primordiais. Em primeiro lugar, a pressão oriunda dos setores industriais sobre a

cadeia dinâmica do torque deve continuar crescendo, influenciando as novas gerações de sensores no que tange à faixa de operação, resolução e incerteza de medição. Por outro lado, a evidente precariedade das calibrações de transdutores dinâmicos efetuadas por padrões estáticos vem levantando sérias dúvidas sobre a confiabilidade das medições dinâmicas. É, portanto, uma contradição inconciliável. Por um lado há uma crescente exigência por melhores condições de medição e resultados confiáveis, por outro, vê-se uma cadeia baseada em procedimentos de calibração questionáveis.

Por sua vez, se especificamente o topo da cadeia de rastreabilidade é observado, nota-se que todo o esforço no desenvolvimento de padrões primários discutido na revisão bibliográfica se concentra em equipamentos capazes de realizar o torque numa condição estática. Os trabalhos de Wegener & Bruns (2009) e Bitencourt et al. (2008) já trazem contribuições no que se referem a propostas de aparatos que sejam capazes de realizar o efeito físico do torque dinâmico. Porém, são trabalhos ainda isolados e limitados a princípios de solução específicos, sem que fossem associados a uma metodologia de desenvolvimento capaz de avaliar e justificar as melhores opções diante de um universo mais amplo de possibilidades.

Com o aumento dos níveis de exigência de incerteza nas medições dinâmicas do torque, o risco do uso de calibrações estáticas em sensores dinâmicos cresce. A possibilidade de que a cadeia de rastreabilidade de torque estático não seja capaz de atender ao torque dinâmico é real e pode afetar decisões importantes no desenvolvimento de um produto, no monitoramento de um equipamento ou ainda em um processo de fabricação, com as consequências nefastas associadas.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou os últimos avanços no desenvolvimento de padrões para atender a cadeia de rastreabilidade do torque e os estudos realizados sobre a incerteza de medição. Pôde-se observar que há esforços contínuos no desenvolvimento de soluções capazes de diminuir a incerteza de medição, principalmente no topo da cadeia de rastreabilidade, inclusive com estudos criteriosos e sistemáticos sobre requisitos e princípios de soluções destinados a padrões primários de baixo torque. Por outro lado, foi possível notar que hoje os sensores de torque dinâmico ainda dependem diretamente de padrões capazes apenas de operar com o torque estático e que os esforços para desenvolver padrões dinâmicos estão apenas se iniciando e ainda de forma esparsa. Um padrão primário de torque dinâmico de uso comercial ainda é um desafio para a comunidade metrológica e pesquisas nesta vertente serão objeto de grande interesse nos próximos anos.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT; ISO Guia 43, Parte 1. Ensaio de proficiência por comparações interlaboratoriais - Parte 1: Desenvolvimento e operação de programas de ensaios de proficiência. Norma Brasileira. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999.
- BICH, W. et al.; Evolution of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Metrologia, n. 43, pp. S161 – S166, 2006.
- BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML; GUM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization). Reprinted 1995.
- BITENCOURT, A. C. P. et al.; Solutions Principles for Small Torque Standard Machine. 53th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, september 2008.
- BRUNS, T.; Sinusoidal Torque Calibration: A Design for Traceability in Dynamic Torque Calibration. XVII Imeko World Congress, 2003, Dubrovnik, Croatia.
- CASTANHO M. A. P. et al.; Validação de Calibração de Termopares pelo Método da Ponte (pontos do ouro e do paládio). Metrologia-2003 – Metrologia para a Vida. Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife, Pernambuco – Brasil, setembro 2003.
- CHUI, Q. S. H. & ZUCCHINI, R. R.; Qualidade de Medições em Química Analítica. Estudo de Caso: determinação de cádmio por espectrofotometria de absorção atômica com chama. Química Nova, vol. 24, N. 3, pp. 374-380, 2001.
- COX, M. G. & SIEBERT, B. R. L.; The Use of a Monte Carlo Method for Evaluating Uncertainty and Expanded Uncertainty. Metrologia, n. 43, pp. S178 – S188, 2006.
- DONATELLI G. D. & KONTATH, A. C.; Simulação de Monte Carlo na Avaliação da Incertezas de Medição. Revista Ciência e Tecnologia, v. 13, n. 25/26, pp. 5 – 15, 2005.
- FREITAS, L. C. C.; Estudo Sobre a Implantação Primária de Torque no Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2006.
- FUJII, Y. et al.; A Proposal for a Dynamic-Response-Evaluation Method for Torque Transducers. Measurement Science and Technology, n. 10, pp. N142 – N144, 1999.
- HALL, B. D.; Evaluating Methods of Calculating Measurement Uncertainty. Metrologia, n. 45, pp. L5 – L8, 2008.

- INMETRO; Vocabulário Internacional de Metrologia, Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. Primeira edição brasileira do VIM 2008 (tradução autorizada pelo BIPM da terceira edição internacional do VIM – International Vocabulary of Metrology. Rio de Janeiro, 2009, 78 p.
- INMETRO & ABNT; Guia para Expressão da Incerteza de Medição, 3ª Edição da Versão Brasileira, 2003.
- KACKER, R. et al.; Evolution of Modern Approaches to Express Uncertainty in Measurement. *Metrologia*, n. 44, pp. 513 – 529, 2007.
- KANG, D. & ELTAWIL, A. E.; Precision measurement of force, mass, and torque. *Measurement*, n. 40, pp. 739 – 740, 2007.
- KRIMMEL, W.; Evolution and Future of Torque Measurement Technology. *Sensors & Transducers Magazine*, v. 65, pp. 500 – 508, 2006.
- KUSELMAN, I.; Design of Experiment for Evaluation of Uncertainty from Sampling in the Framework of the Fitness for Purpose Concept: a case study. *Accreditation and Quality Assurance*, n. 13, pp. 63 – 68, 2008.
- MACHADO, R.; Rastreabilidade de Ensaio Mecânicos em Implantes Ortopédicos. Apresentação em slides, visto em http://www.redetec.org.br/publique/media/vii_seminario_metrologia_palestra_renato_machado_inmetro.pdf, em 29 de dezembro de 2009.
- MERLO, S.; The Uncertainty of Torque Primary Standards: a comprehensive analysis. *Measurement*, n. 29, pp. 279 – 285, 2001.
- MOSCATI, G. et al.; Incerteza de Medição pelo Método de Monte Carlo, no Contexto do Suplemento 1 do GUM. Enqualab – Encontro para a Qualidade de Laboratórios. São Paulo, 2004.
- ORREGO, R. M. M.; Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: considerações gerais. *Revista de Ciência & Tecnologia*, vol. 8, nº 16, pp. 43-56, 2000.
- PARK, Y. K. et al.; Development of a Small Capacity Deadweight Torque Standard Machine. *Measurement Science and Technology*, n. 18, pp. 3273 – 3278, 2007.
- PESCHEL, D.; The State of the Art and Future Development of Metrology in the Field of Torque Measurement in Germany. PTB, Braunschweig, 2007.
- PRATT, B. C. et al.; The Calibration of Torque Measuring Devices to British Standard BS 7882:1997. UKAS Lab. Paper for NCSLI. 23 p., 2002.
- RÖSKE, D.; The New Version of the German Torque Calibration Standard DIN 51309:2005-12 a Comparative Overview. *Proceedings of IMEKO 20th International Conference*, 2007.
- TU ILMENAU, UFCS, UFBA.; Scientific Fundamentals for the Realization and Measurement of Small Torques – DEBRATOR, 2008.
- WEGENER, G. & ANDRAE J.; Measurement Uncertainty of Torque Measurements with Rotating Torque Transducers in Power Test Stands. *Measurement*, n. 40, pp. 803 – 810, 2007
- WEGENER, G. & BRUNS, T.; Traceability of Torque Transducers Under Rotating and Dynamic Operation Conditions. *Measurement*, n. 42, pp. 1448 – 1453, 2009.

A STUDY ON THE CHAIN TRACEABILITY TORQUE MEASUREMENT

Tarso Barretto Rodrigues Nogueira¹
Luis Alberto Breda Mascarenhas¹
Herman Augusto Lepikson²

¹SENAI CIMATEC

²Universidade Federal da Bahia

Abstract: *Abstract: The concern about the reliability of measurement results actually appeared in the 1970s. In the following years, deep studies about the theme established methods and allowed the creation of a new metrological culture worldwide. The development of a measurement traceability chain capable of binding the unit of measurement and uncertainty of results performed on the factory floor to a universally recognized primary standard is strongly related to the search for reliability of the measurements. The metrological quantity torque has a strong presence in the industry, although it has little popularity for the general public. The torque quantity became a priority in different sectors of society, from medicine to the automotive industry, both in measuring the static and dynamic measuring. In addition to the growing importance for the production, the torque is going through significant metrological changes. Its measuring interval has been increasing and the level of acceptable outcome uncertainty decreasing significantly. Efforts have been conducted for the development of primary standards that can meet the current requirements of the traceability chain, especially in relation to static torque. The purpose of this work is to study the current situation of the traceability chain of torque, assess its main weaknesses and reveal the latest developments in establishing operating ranges with wider and lower uncertainties in the reproduction of quantity, particularly in its employment in dynamic measurements.*

Keywords: *torque, traceability, dynamic measurement.*