



Produto & Produção, vol. 11, n. 1, p. 41 - 55, fev. 2010
Edição Metrologia

Padrão Primário para Baixo Torque e Esforços para Melhoria da sua Incerteza

Antônio Carlos Peixoto Bitencourt, *MSc.*
Walter Lindolfo Weingaertner, *Dr*
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
a.carlos@imp.ufsc.br

Herman Augusto Lepikson, *Dr*
Universidade Federal da Bahia – UFBA
herman@ufba.br

René Theska, *Dr*
Technische Universität Ilmenau – TU-Ilmenau
rene.theska@tu-ilmenau.de

RESUMO

Este artigo apresenta a análise do estado da arte em padrões de torque. Foca-se no entendimento da dificuldade em realizar torque abaixo de 1 Nm com incertezas relativas na ordem 10^{-5} . Este limite do estado da arte contrasta com a crescente demanda por miniaturização e suas implicações em calibração nesta faixa de medição. Por fim, apresentam-se as iniciativas de avançar o estado da arte em padrão primário de torque para esta faixa.

Palavras-chave: padrão de torque; microtorque

1 INTRODUÇÃO

O entendimento e domínio das principais grandezas metrológicas são fundamentais para a competitividade industrial e para os agentes em ciência e tecnologia encarregados de assegurar a adequada rastreabilidade, o que implica no desenvolvimento e operação de padrões primários. O torque é uma das grandezas importantes para a competitividade, pois está presente em diferentes ramos industriais, principalmente nas atividades de montagem, avaliação e ajustagem de sistemas que envolvem desde a indústria automobilista, naval, petrolífera, aeronáuticas até dispositivos e equipamentos de precisão, próteses dentárias e ortopédicas, sistemas de avaliação tribológica, dispositivos metrológicos, micromotores, sistemas micro-elétricomecânicos (MEMs), entre outros.

Em termos de rastreabilidade do torque, entretanto, tem-se atendido apenas parte desta demanda. Apesar da tendência atual de miniaturização dos sistemas técnicos, verifica-se que esta faixa de torque é a menos atendida pelos atuais padrões primários. Este artigo discute o estado da arte atual em medição de torques abaixo de 1 Nm e as limitações da realização de torques de referência para esta faixa em padrões primários.

2 MEDIÇÃO DE MICROTORQUE

A miniaturização dos sistemas técnicos é uma tendência clara na indústria e na academia. A avaliação das características técnicas dos microatuadores surge com crescente demanda. As principais características destes são rotação e torque (freio, eixo preso, entre outros). A Tabela 1 apresenta uma amostra dos princípios de microatuadores e suas faixas de trabalho.

Tabela 1 - Exemplo de princípios de microatuadores (BRENNER; SUEMECZ; VUJANIC, 2003)

Princípio	Torque (Nm)	Velocidade (RPM)	Entrada
Síncrono (eletroestático)	$10^{-7} - 10^{-6}$	$10^3 - 10^4$	20 – 100 V
Piezelétrico	$10^{-7} - 10^{-6}$	120 - 150	5 – 10 V
Ultrasônico	$10^{-8} - 10^{-7}$	180 - 200	5 – 10 V
Eletr magnético	$10^{-8} - 10^{-7}$	10^4	~1 V
Térmico (turbina a gás)	10^{-4}	$2,4 \cdot 10^6$	15g/h de H ₂
Motor de fluxo	$10^{-6} - 10^{-5}$	$> 10^4$	30 – 90 cm ³ /min
Redutor de engrenagem	$3 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^3$	7,5Nm, 100.000 rpm

Verifica-se que os valores de torque dos microatuadores estão além dos limites atuais do principal e mais comum princípio de medição de torque, que é por meio de extensimetria. Este princípio corresponde à adoção de extensômetros dispostos em Ponte de Wheatstone para a medição da torção gerada pela aplicação do torque num elemento elástico (BEIHOFF, 1996). Os transdutores de torque que se baseiam nesta abordagem têm como limite mínimo na ordem de 10^{-2} Nm e são aplicados principalmente em viscometria e equipamentos médicos.

Por outro lado, requerem-se sistemas de medição que atendam a necessidade de caracterização e avaliação da crescente oferta de microsistemas (BRENNER; SUEMECZ; VUJANIC, 2003; BENCZE; BRÜMMER ; TIMTNER, 2002; ACAR *et al.*, 2009). Por este motivo, encontram-se na literatura pesquisas que abordam a medição de torque na ordem de grandeza de μNm . Os princípios de medição são dos mais variados desde deformação elástica de elemento flexível até aplicação de turbinas e de fluídos de viscosidade conhecida. As principais abordagens são apresentadas nas próximas subseções.

2.1 Deformação de Elemento Flexível

Acar *et al.* (2009) apresentam a proposta de medição de torque apresentado na Figura 1. Este sistema foi desenvolvido para atender a necessidade de medir o torque transiente de medidor mecânico de vazão. O protótipo de testes desta proposta consiste de um motor CC (1) com isolamento de vibração utilizado para movimentar o árvore (2) até uma velocidade máxima de 1,5 rpm. Nesta árvore é acoplada uma mola espiral (5), a qual é conectada ao medidor de vazão (8) por um acoplamento com superfície espelhada (7). Um laser díodo e um PSD (*Position Sensitive Device*) (6) são empregados para a medição da deformação da mola espiral. O laser refletido na superfície espelhada do acoplamento atua no PSD. A deformação da mola espiral promove um deslocamento proporcional do feixe de laser sobre o PSD (Figura 1b).

Esta proposta conseguiu medir torque transiente do medidor de vazão de $250 \mu\text{Nm}$, entretanto se verificou a influência negativa da aceleração da gravidade e da configuração do acoplamento. Apesar destas fontes de incerteza, a medição de microtorque por meio de molas espirais mostrou-se viável e com possibilidade de ajuste da sensibilidade e escala por meio da configuração da mola espiral e do posicionamento do laser e do PSD.

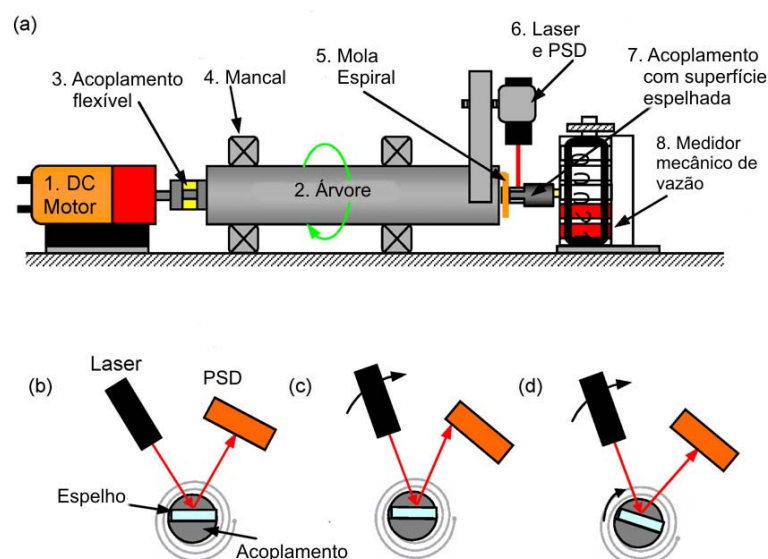


Figura 1 - Medição de baixo torque com mola espiral (ACAR *et al.*, 2009)

Abraham *et al.* 2009 apresentam outra proposta de medição de micro torque baseada na deformação de um elemento flexível. Neste caso foi adotada a

configuração de molas cruzadas, cuja deformação é também medida com laser e PSD. A caracterização do micromotor é realizada por meio do torque de frenagem. Este princípio é válido para motores em que existe a relação construtiva entre velocidade e torque. Os autores afirmam que conseguiram medir torque da ordem de 200 μNm com erro máximo de 1%. A faixa de medição e sensibilidade pode ser alterada por meio de ajustes do material e configuração da mola e da disposição do laser e do PSD. Os autores afirmaram que conseguiram testes na faixa de $\pm 50 \mu\text{Nm}$.

2.2 Viscosidade de Fluido Conhecido

Abordagem mais comum de caracterização de micromotores e micro-atuadores é por meio do torque de frenagem ou torque de eixo-preso, como os exemplos apresentados anteriormente. Entretanto, faz-se necessário avaliar o torque do motor a uma dada velocidade. Neste sentido, Navarro *et al.* (2006) apresentam uma proposta que adota um fluido de viscosidade conhecida para a medição do torque de micromotores.

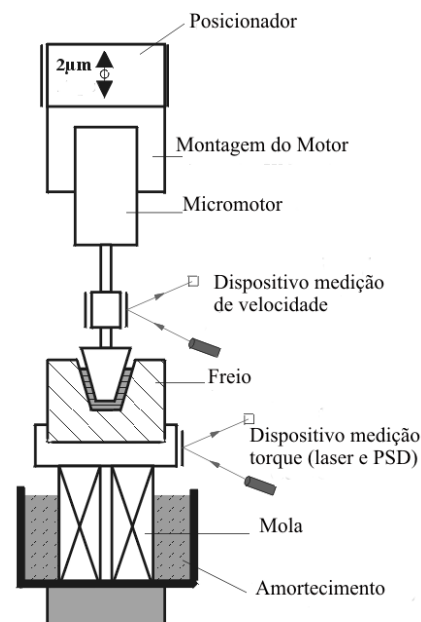


Figura 2 – Medição de microtorque com frenagem e elemento flexível (ABRAHAM *et al.*, 2009)

Esta proposta consiste no acoplamento do micromotor a um cilindro que é imerso num cilindro contendo fluido de viscosidade calibrada. O torque do motor é transmitido ao cilindro externo através do fluido. Este torque, por sua vez, é medido com a fixação de braço de alavanca com células de carga que medem a força resultante do torque no cilindro externo. A adoção de diferentes fluidos ou dimensões dos cilindros é possível medir torque numa faixa ampla de trabalho, não somente o torque de frenagem. Os autores afirmam que conseguiram medir $2 \times 10^{-3} \text{ Nm}$ com resolução de $2 \times 10^{-5} \text{ Nm}$.

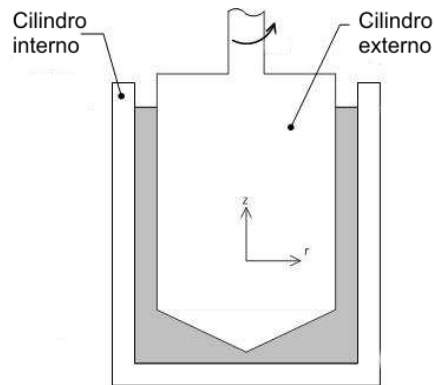


Figura 3 – Medição de torque com fluido de viscosidade calibrada (NAVARRO *et al.*, 2006)

2.3 Microturbinas

Esta proposta se baseia no torque de frenagem resultante da queda de pressão numa microturbina acoplada ao eixo do micromotor sob teste (OTA *et al.*, 2001). O princípio de medição é apresentado na Figura 4. Durante a operação a bomba de vácuo gera uma diferença de pressão entre o ambiente externo e na câmara de vácuo. Esta diferença de pressão gera uma força proporcional à área e ao número de pás da microturbina.

O torque por sua vez é gerado pela ação desta força no raio médio das pás multiplicado a um fator experimental relacionado aos erros de posicionamento e vazamentos. Como base neste princípio o torque de frenagem em uma dada velocidade é auferido medindo-se a pressão da câmara por meio do sensor de pressão e a velocidade de rotação por meio do sensor óptico. A válvula de regulagem de pressão tem função de estabelecer a faixa de medição. Os autores relatam que obtiveram medição de torque na ordem de 10^{-7} Nm, entretanto não relatam dados sobre a repetitividade ou erro máximo.

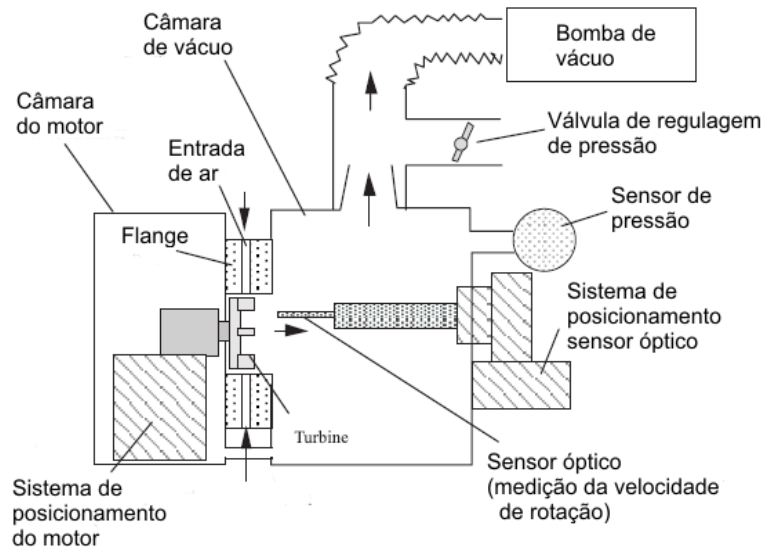


Figura 4 - Princípio de medição de microtorque baseado em queda de pressão em microturbina (OTA *et al.*, 2001)

Na literatura se encontram outras propostas de sistema de medição de microtorque. Estas propostas apresentam outros princípios de caracterização de micromotores, destaca-se entre eles a abordagem de determinação do torque de frenagem. Outra constante nestas propostas é o uso do termo calibração para descrever o processo de caracterização e determinação das curvas características dos sistemas de medição, pois se utiliza motores, fluídos, entre outros com características conhecidas. Embora estes não sejam rastreados a algum padrão primário.

Esta última observação revela a necessidade de desenvolver padrões de baixo torque que suporte a calibração metrológica destes sistemas de medição. Os atuais padrões de torque são destinados principalmente à calibração de transdutores por deformação elástica e extensometria, além de se destinar a faixa de medição que se pode chamar de macrotorque. Este fato implica na necessidade do desenvolvimento de novos procedimentos de calibração, além do desenvolvimento do próprio padrão primário para que possa atender os diferentes princípios de medição de microtorque.

3 ESTADO DA ARTE EM PADRÃO PRIMÁRIO DE TORQUE

A metrologia de torque passou por um período de ostracismo tecnocientífico devido à consideração de que o domínio das grandezas força e comprimento seriam suficientes para a realização do torque, entretanto se verifica que a realização do torque compreende elementos complexos além da realização destas grandezas básicas. Deve-se considerar também a conexão e interação entre as duas grandezas e como transferir o torque gerado ao elemento sob teste (BAUMANN, 1983; PESCHEL; RÖSKE, 2005; SCHMIDT, 1995). Verifica-se um crescimento do interesse no desenvolvimento de padrões de torque a partir da década de 90 com destaque as iniciativas do PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) Instituto Nacional de Metrologia (INM) da Alemanha (PESCHEL, 1997).

O PTB, além de desenvolver os seus próprios padrões e procedimentos para a rastreabilidade de torque, apoia o desenvolvimento em outros INMs. Também detém

a mais ampla faixa de realização de torque (1×10^{-3} - $1,1 \times 10^6$ Nm) (PESCHEL, 1997). Outros países também se destacaram no desenvolvimento de padrões de torque. Esta lista pode ser auferida dos serviços cadastrados no BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*) e em diferentes publicações (BITENCOURT *et al.*, 2008; KANG; ELTAWIL, 2007). O Inmetro também está empreendendo a capacitação do País na metrologia do torque, que se iniciou, principalmente, depois da aquisição do padrão primário que atende a faixa de ($2 - 3 \times 10^3$) Nm, incerteza de 1×10^{-4} (OLIVEIRA *et al.* 2005). Além disto, têm-se direcionado esforços para a organização e disseminação da metrologia de torque no Brasil (OLIVEIRA *et al.*, 2005; OLIVEIRA; FREITAS; CRUZ 2003; FREITAS; COSTA; OLIVEIRA, 2006; FREITAS, 2006; FREITAS *et al.*, 2007).

Verifica-se o domínio na realização do torque para a faixa entre 1 Nm a 1×10^4 Nm. Além do número de padrão primário de torque, observa-se a menor incerteza relativa expandida na ordem de 10^{-5} , encontra-se nesta faixa. Para a faixa abaixo de 1 Nm, entretanto, verifica-se maiores valores de incerteza, cujo melhor valor é 2×10^{-4} , para o torque de 1×10^{-2} Nm (PESCHEL, 1997).

A relação de países, que possuem padrão primário de torque, pode ser estimada pela capacidade de calibração e medição dos INMs cadastradas no BIPM. Desta listagem, pode-se observar que:

- a menor incerteza relativa expandida é de 10^{-5}
- o menor valor de torque cadastrado 1×10^{-3} Nm (Alemanha) e o maior é 2×10^5 Nm (França). Entretanto, o maior torque nominal realizado por padrão de torque disponível na literatura é $1,1 \times 10^6$ Nm (PESCHEL *et. al.*, 2005).

Em relação aos padrões de torque encontrados na literatura pesquisada, pôde-se classificá-los segundo sua estrutura (horizontal ou vertical) e a forma de geração do toque de referência (comparação direta (peso-morto) ou comparação indireta (atuador externo e celular de carga)) (BITENCOURT, 2008).

Padrão primário na configuração horizontal com peso morto é a configuração mais freqüente na literatura. Destaca-se pela simplicidade construtiva, apesar de existir variações com até dois braços de alavanca.

3.1 Princípio Técnico de Padrão Primário de Torque

Nesta seção se detalham o princípio de peso-morto e a configuração horizontal que é o mais adotado nos padrões primários atuais. Este também é o princípio adotado pelo padrão primário com menor faixa de trabalho 1×10^{-3} Nm.

O princípio de peso-morto parte do conceito da ação de um binário de força atuando num eixo de rotação de um corpo, Figura 5. Como base neste princípio gera-se o torque puro, pois as forças se anulam e somente torque gerado pelo binário atua sobre o eixo de rotação. Este conceito é implementado nos padrões primários de torque segundo a Figura 6.

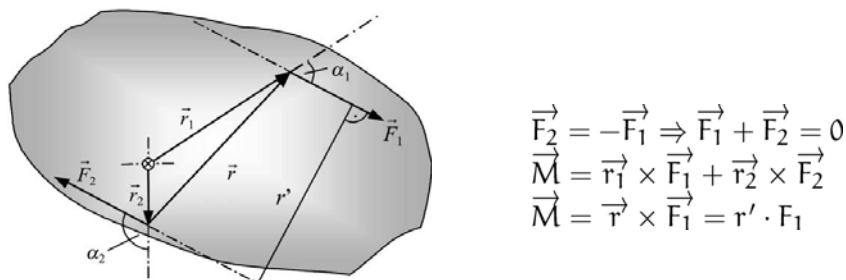


Figura 5. Definição de torque com binário de força (PESCHEL; RÖSKE, 2005)

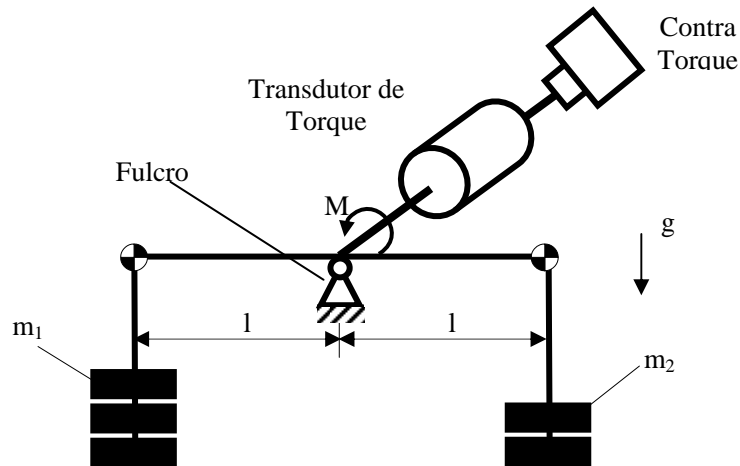


Figura 6. Princípio de peso morto aplicado aos padrões de torque (MERLO, 2001)

O binário de força é formado pela resultante das forças geradas pela ação da gravidade atuantes num braço de alavanca em massas padrões e pela força de reação do apoio central do braço de alavanca (fulcro). De modo geral, o conjunto de massa está imerso num ambiente com ar atmosférico, sendo então necessário compensar a força empuxo Eq. (1).

$$F = m \cdot g \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ar}}{\rho_m}\right) \quad (1)$$

Onde:

$$m = m_1 - m_2$$

ρ_{ar} e ρ_m são as densidades atmosférica e das massas, respectivamente.

Com a aplicação na força no braço de alavanca, este sofre um deslocamento angular ao redor do mancal de apoio. O dispositivo de contratorque aplica o torque de forma que o braço de alavanca mantenha a horizontalidade. O torque de referência é dado pela Eq. (2). Sendo que M é o torque real que aplicado ao transdutor de torque, M_N é torque nominal de referência com o qual o transdutor de torque é calibrado e M_{at} refere-se ao torque resistivo gerado no fulcro.

$$M = M_N + M_{at}$$

$$M_N = F \cdot l + M_{at}$$

3.2 Padrão Primário para ($1 \times 10^{-3} - 1$) Nm

O princípio de peso morto é o que promove melhores características metrológicas aos padrões primários de torque. Sendo aplicado em toda a faixa de torques disponível atualmente de realização da grandeza ($1 \times 10^{-3} - 1,1 \times 10^6$) Nm. Nesta seção se destaca o padrão primário de torque disponível atual com a menor faixa ($1 \times 10^{-3} - 1$) Nm, Figura 7.

Este padrão foi desenvolvido e é mantido pelo PTB. Ele é aplicado principalmente para a calibração de transdutores de torques destinados a viscosímetros de torção. O PTB declara que a incerteza relativa expandida deste dispositivo é de 10^{-4} , entretanto é o valor da melhor capacidade de medição e se refere aos valores na faixa de 0,01 Nm – 1 Nm. Para valores abaixo desta faixa, este padrão é aplicado em experimentos de realização de baixo torque, mas a melhor incerteza alcançada é de 10^{-3} .



Figura 7 - Padrão Primário de Torque 1Nm (Fonte: PTB)

Além do sistema do braço de alavanca, do sistema de carregamento das massas padrões e de uma câmara protetora contra ação do fluxo de ar nas massas padrões e braço de alavanca, Figura 7, este dispositivo é composto por um sistema de posicionamento cartesiano para estudos dos efeitos do desalinhamento na montagem do transdutor de torque durante a calibração (1), a este é acoplado o motor responsável pelo contratorque (2). O transdutor de torque é acoplado ao dispositivo através de acoplamentos flexíveis (3). O braço de alavanca é suportado por um mancal aerostático (4).

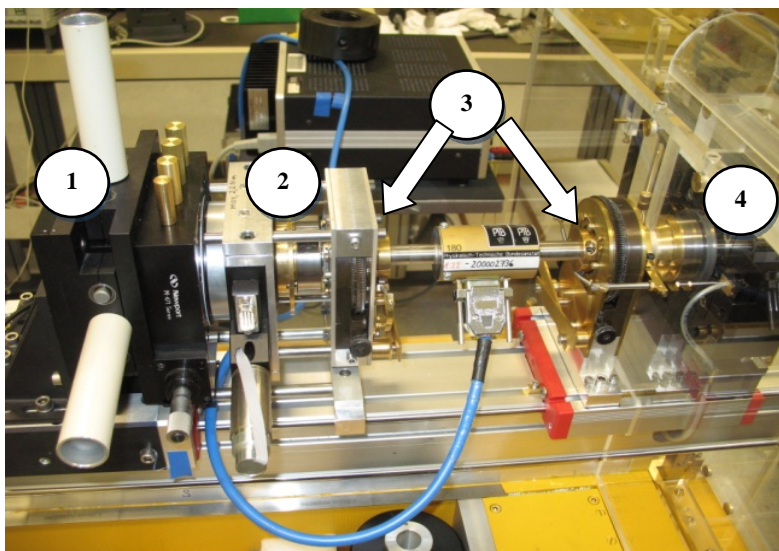


Figura 8. Componentes do Padrão Primário de Torque 1Nm (Fonte: PTB)

Em entrevista com o responsável por este padrão primário evidenciou a necessidade de diminuir a incerteza relativa para pelo menos ao mesmo nível dos outros padrões (10^{-5}). Segundo suas observações o sistema de controle de carregamento das massas padrões é a principal fonte de incerteza deste dispositivo.

3.3 Outros Padrões Primários para Baixo Torque

Têm-se verificado um crescente interesse no desenvolvimento de padrões primários de torque para baixo torque (<10 Nm). Da atual literatura técnica disponível sobre o tema esta tendência é principalmente verificada nos países orientais e europeus com tradição na indústria de dispositivos eletrônicos, micromotores e dispositivos mecatrônicos aplicados na medicina (PARK; KIM; KANG, 2007; YON-KYU et al., 2007; AVERLANT; GOSSET, 2007; PUSA; SACHS, 2006).

Entretanto a faixa de realização destas propostas ainda estão acima da já realizada hoje no Padrão Primário de Torque 1Nm do PTB. Possíveis causas para este fato é a tradição em metrologia e torque do PTB e a própria limitação do princípio de realização do torque adotado, peso-morto.

3.4 Limitações do Princípio de Peso Morto para a Realização de Baixo Torque

A principal limitação do princípio de peso morto para a realização de baixo torque está relacionada à incerteza relativa do torque de referência gerado pelo padrão de torque (PESCHEL; RÖSKE, 2005; MERLO, 2001). Tome-se a Eq. (2) que descreve a intensidade do torque gerado pelo princípio de peso morto e calcule-se a propagação de incerteza do torque de referência ($\frac{u(M)}{M_N} = u_r(M)$), Eq. (3).

$$\frac{u^2(M)}{M_N^2} = u_r^2(F) + u_r^2(l) + \frac{u^2(M_{at})}{M_N^2} \quad (3)$$

Verifica-se que a incerteza é relativa ao torque nominal (M_N) resultado da aplicação da força da gravidade no braço de alavanca e não ao torque realmente gerado pelo padrão (M) e aplicado ao transdutor de torque, pois o apoio do braço gera um torque resistivo à rotação do braço de alavanca (M_{at}). A contribuição do atrito gerado no apoio do braço de alavanca é ainda mais significativa na realização de pequenos torques, pois esta varia inversamente a este $\frac{u^2(M_{at})}{M_N^2}$.

Em relação à contribuição da força (Eq. 4), verifica-se que as densidades do material e do ar influenciam na incerteza da força, mas o componente mais significativo é a incerteza das massas. A geração de forças compatível à realização de baixo torque implica no desenvolvimento de massas padrões com perfis que favoreçam sua manipulação e carregamento no braço de alavanca, bem como de materiais homogêneos, de baixa dilatação e que não influencie eletromagneticamente no conjunto.

$$u_r^2(F) = u_r^2(m) + u_r^2(g) + \left[\frac{\rho_{ar}}{\rho_m - \rho_{ar}} \right]^2 \cdot [u_r^2(\rho_{ar}) + u_r^2(\rho_m)] \quad (4)$$

A contribuição do comprimento do braço de alavanca possui vários componentes, Eq. (5). A carga é aplicada num braço de alavanca com comprimento inicial (l_0), com a aplicação da carga verificam-se os desvios angulares (θ e φ). Também pode ocorrer dilatação térmica de $(1 + \alpha_T \Delta T)$ devido à variação da temperatura de medição de l_0 e a temperatura de operação do padrão (ΔT). Por fim, outro fenômeno que pode ocorrer é um encurtamento do braço em $f(F)$ provocado devido à ação da carga (MERLO, 2001).

Destes diversos fatores, os mais significativos para a realização de baixos torques são a definição da linha de ação da força gerada pelas massas padrões (θ e φ), a estabilidade do valor do raio de giro (distância entre fulcro e ponto de aplicação da força) (l_0) e dilatação térmica $(1 + \alpha_T \Delta T)$. Destes o mais crítico é a estabilidade e localização do raio de giro, pois, além de ser difícil de ser equacionado, sofre influência de diferentes fontes: comportamento do apoio do braço de alavanca, carregamento, contratorque e sistema de controle.

$$l = l_0 \cos(\theta) \cos(\varphi) (1 + \alpha_T \Delta T) f(F) \quad (5)$$

$$u_r^2(l) = u_r^2(l_0) + u_r^2(f(F)) + \tan^2(\theta) u^2(\theta) + \tan^2(\varphi) u^2(\varphi) + \left(\frac{\alpha_T \Delta T}{1 + \alpha_T \Delta T} \right)^2 [u_r^2(\alpha_T) + u_r^2(\Delta T)] \quad (6)$$

Verifica-se que o apoio do braço de alavanca influencia diferentes fontes de incertezas de padrões de torque, principalmente, as relacionadas ao atrito resistivo. É por este motivo que é o principal item das pesquisas em padrão primário de torque. A principal variante utilizada nos padrões de torque para a função de apoio e determinação do centro de rotação é o mancal aerostático, por fornecer o menor valor de momento resistivo. Entretanto, esta não deve ser a única característica, pois o suporte além de menor torque resistivo deve garantir a estabilidade do eixo e do raio de giro. Neste sentido, outras variantes de mancais também se capacitam para a função de apoio de padrões de torque, como por exemplo: flexível e cunha.

Ambas variantes geram mais atrito do que o mancal aerostático, entretanto o momento resistivo depende da posição de trabalho do mancal que pode ser determinada e, assim, o atrito anulado. A variante de mancal flexível deve ser

investigada de forma mais detalhada e experimental, devido aos resultados obtidos do seu emprego na medição de microtorque.

Mesmo com as observações descritas sobre o princípio de peso morto, acredita-se que este não atenderá a faixa de calibração de microtorque, pelo menos não com a adoção da força gerada pela ação da gravidade em blocos de massa padrão. Sendo necessário o estudo e aplicação de outros princípios de geração de força, por exemplo: eletromagnética ou piezolétrica.

4 ABORDAGEM PARA O DESENVOLVIMENTO DA RASTREABILIDADE DO MICROTORQUE

Diante deste contexto de restrições e demandas, verifica-se um amplo espaço para o desenvolvimento de pesquisas básicas e aplicadas destinadas ao aprofundamento do domínio da realização e rastreabilidade do torque. Uma rede de pesquisa internacional foi estruturada para suportar este desenvolvimento, composta por duas universidades brasileiras (Universidade Federal de Santa Catarina e Universidade Federal da Bahia), uma universidade alemã (*Technische Universität Ilmenau*), uma empresa finlandesa responsável pela grandeza torque nesse país (*Lahti Precision Oy*) e três importantes INMs (Inmetro-Brasil, PTB-Alemanha e MIKES-Finlândia), os quais manifestaram o interesse e a intenção em colaborar com estes esforços. Cada um desses atores possui especialidades em áreas estratégicas para a execução da pesquisa: engenharia de precisão, mecatrônica, sistemas de microposicionamento e metrologia.

Os esforços se iniciaram com o desenvolvimento dos fundamentos técnicos e científicos necessários à proposição de um padrão primário de torque para 1×10^{-3} Nm com $U_r(k=2) = 10^{-5}$, avançando, desta forma, os limites atuais do estado da arte em padrões primário de torque utilizando princípio de peso morto. Em seguida, persegue-se o objetivo de desenvolvimento, para a mesma faixa, de padrão de primário de torque para as condições de rotação e dinâmicas. Por fim, segue-se a proposição de padrão e procedimento para a calibração para a faixa de microtorque, Figura 9.

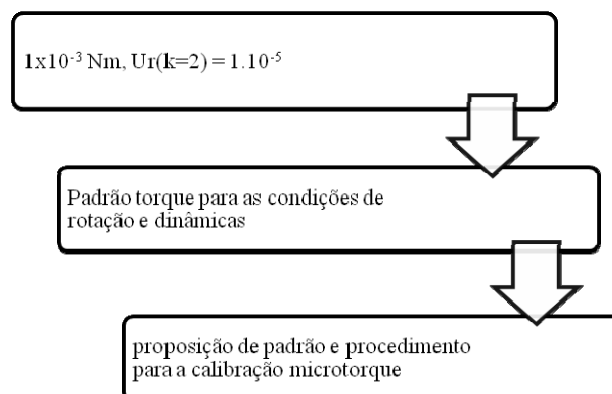


Figura 9 – Abordagem de pesquisa para desenvolvimento de padrão primário para microtorque

5 CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta uma amostra de abordagens de medição de microtorque. Destaca-se a variedade de princípios de medição adotados na caracterização de micromotores e microatuadores. Ressalta-se que a demanda por calibração, e por consequente de padrões primários, desta faixa da grandeza torque já é uma realidade.

Apresenta-se também uma análise do estado da arte no desenvolvimento de padrões primários de torque. Verifica-se desta análise as limitações do atual princípio utilizado nos padrões primário para a realização de torque abaixo do 1 Nm.

A sistematização destas demandas representa um campo amplo para pesquisa, o que justificou a criação de uma rede internacional de instituições especializadas com o objetivo de desenvolver soluções para padrões de torque em resposta à crescente demanda de miniaturização dos sistemas mecatrônicos.

ABSTRACT

This article shows the analysis of state of the art in primary torque standards. It is focused in the difficulty understanding on torque quantity realization less than 1 Nm with relative uncertainty in the order 10^{-5} . The state of the art limit is in contrasts to crescent requirement for miniaturization. At the end, it shows initiatives to overcome the state of the art in primary torque standard at this range.

Keywords: torque standard; microtorque

AGRADECIMENTOS

Deve-se agradecer ao CNPq pelo fornecimento de bolsa de pesquisa, à CAPES, FINEP e ao DFG pelo suporte à rede de pesquisa.

REFERÊNCIAS

BRENNER, W.; SUEMECZ, F. e VUJANIC, A. *Principles of micro torque measurement - an overview*. Proceedings, XVII IMEKO World Congress, IMEKO, 2003

BEIHOFF, B. *A survey of torque transduction methodologies for industrial applications Pulp and Paper Industry*. Technical Conference, Conference Record of 1996 IEEE Annual, 220-229, 1996

BENCZE, A. BRÜMMER, G. e TIMTNER, K. *Micro-Drehmomentmeßsystem μ -ETC.* Tagungsband 4. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung, Band 46, 607-620, 2002

ACAR, M.; ATTERBURY, D.; FISHER, D.; LEWIS, M.; PORRO, J. e SEYMOUR, H. A method for measuring and calibrating resistive microtorque of a mechanical microcounter Precision Engineering, 33, 209 – 213, 2009

ABRAHAM, G.; DUFFAIT, R.; WURMSDOBLER, P.; MATZNER, A. e BRENNER, W. *Principles of torque measurement for rotating microactuators Sensors*, 2002. Proceedings of IEEE, 2, 1757-1761, vol.2, 2002

NAVARRO, J. I. H.; ASCANIO, G.; HUERTA, L. R. e RUIZ, A. C. MEASUREMENT OF TORQUE IN MICROMOTORS XVIII IMEKO World Congress, TC3, 2006

OTA, H.; OHARA, T.; KARATA, Y.; NAKASIMA, S. & TAKEDA, M. Novel micro torque measurement method for microdevices Journal of Micromechanics and Microengineering, 11, 595-602, 2001

PESCHEL, D. e RÖSKE, D., Messunsicherheiten bei der Drehmomentmessung. tm - Technisches Messen, v.72, n.5, may, p.308-324, 2005.

BAUMANN, E. Sensortechnik für Kraft und Drehmoment. Berlin. (Reihe Automatisierungstechnik ; 205), 1983

SCHMIDT, U. Ein Beitrag zur Drehmomentmessung. Institut für Mectechnik der Universität-Gesamthochschule, Dissertation, 1995.

PESCHEL, D. The state of the art and future development of metrology in the field of torque measurement in germany. XIV IMEKO World Congress, 3, 65-71, 1997.

BITENCOURT, A. C. P.; WEINGAERTNER, W. L.; STOETERAU, R. L.; THESKA, R. & LEPIKSON, H. A. Development of Torque Standard Machine. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 18 a 22 de agosto, Salvador, Bahia, Brasil, 2008.

KANG, D.I. e ELTAWIL, A. Precision measurement of force, mass, and torque. Measurement, 40, 739-740, 2007

OLIVEIRA, R.; CABRAL, L.; KOLWINSKI, U. e SCHWIND, D. Performance of the new primary torque standard machine of INMETRO, Brazil. Proceedings of 19th International Conference on Force, Mass & Torque, Office of Conferences and Publications National Institute of Standards (NIS) Egypt, 2005

OLIVEIRA, R. S.; de FREITAS, L. C. C. e CRUZ, J. A. P., Interpretação e Aplicação das Normas NBR-12240 e ISO-6789 na Calibração de Instrumentos de Medição de Torque., in 'Metrologia 2003', SBM. 2003

FREITAS, L.C.C., da COSTA, S.R. e de OLIVEIRA, R.S. A new methodology for harmonization in the dissemination of the torque quantity in Brazil. XVIII IMEKO World Congress, IMEKO, 2006

FREITAS, L. C. C. D. Estudo sobre a implantação primária de torque no Brasil. (Mestrado Profissional). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

FREITAS, L.C.C., da COSTA, S.R.R., de OLIVEIRA, R.S. e KOCH, C.A. The torque metrology management in Brazil. IMEKO (ed.) Proceedings, IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference, Cultivating metrological knowledge, 2007

PESCHEL, D.; MAUERSBERGER, D.; SCHWIND, D. e KOLWINSKI, U. The new 1.1 MNm torque standard machine of the PTB braunschweig/Germany Proceedings of 19th International Conference on Force, Mass & Torque, Office of Conferences and Publications National Institute of Standards (NIS) Egypt, 2005

MERLO, S. The uncertainty of torque primary standards: a comprehensive analysis. Measurement, 29, 279-285, 2001

PARK, Y.; KIM, M. e KANG, D. Development of a small capacity deadweight torque standard machine Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, 2007, 18, 3273-3278

YON-KYU, P.; MIN-SEOK, K.; JONG-HO, K.; JAE-HYUK, C. e DAE-IM, K. Establishment of torque standards in KRISS of Korea 20th Conference on Measurement of Force, Mass and Torque (together with 3rd Conference on Pressure Measurement & 1st Conference on Vibration Measurement), 2007

AVERLANT, P. e GOSSET, A. Development of the new LNE 50 Nm deadweight torque standard machine 20th Conference on Measurement of Force, Mass and Torque (together with 3rd Conference on Pressure Measurement & 1st Conference on Vibration Measurement), 2007

PUSA, A. e SACHS, M. TORQUE CALIBRATION DEVICES FROM 0,1 Nm UP TO 20 kNm XVIII IMEKO World Congress, IMEKO, 2006, TC3