

Métodos e técnicas de medição de torque diretamente em eixos rotativos

Jacques Cousteau da Silva Borges ^[1], Carlos Alberto Nóbrega Sobrinho ^[2], Abel Cavalcante Lima Filho ^[3], Francisco Antônio Belo ^[4]

[1] cousteau.borges@ifrn.edu.br. IFRN – Campus Natal Central, Lab. Física. [2] carlosalberto.ifpb@gmail.com. IFPB – Campus Princesa Isabel. [3] abelima@gmail.com. UFPB, CT, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. [4] belo@les.ufpb.br. UFPB, LES, Departamento de Engenharia Elétrica.

RESUMO

Medir e controlar o torque em sistemas rotativos é essencial para prevenir rupturas, danos, desgastes e demais avarias que a máquina possa sofrer devido ao torque excessivo em determinado eixo. Contudo, realizar essa medição em plena operação da máquina/sistema não é uma tarefa simples, devido principalmente à necessidade de se extrair informações sob eixo em rotação. Atualmente, são utilizados sistemas que devem ser eletricamente alimentados, e seus dados são adquiridos por anéis coletores, transformadores ou sistemas de telemetria. É um desafio da atualidade a implementação de novas técnicas capazes de mensurar o torque sobre o eixo em plena rotação, e entender os diferentes métodos é essencial para superar esse desafio. Apresentam-se a seguir os detalhes referentes às medições de torque em eixos em rotação, presentes na literatura já consolidada, bem como alguns métodos e técnicas inovadoras que possibilitam realizar a leitura do torque, seja através da medição direta da deformação radial, seja através das medições por meio do ângulo de torção. Também são apresentadas, inicialmente, as técnicas convencionais e uma breve construção histórica desses métodos, e por fim os possíveis desdobramentos que as recentes pesquisas possam ter.

Palavras-chave: Medição de torque. Instrumentação. Extensômetros. Interferometria.

ABSTRACT

Measure and control the torque in rotating systems is essential to prevent disruptions, damage, wear and other damage to the machine may suffer due to excessive torque in particular axis. However, make this measurement in full operation of the machine / system is not a simple task, mainly due to the need to extract information under rotating shaft. Currently, systems that are used must be electrically powered, and its data are acquired by slip rings, transformers or telemetry systems. It is a topical challenge the implementation of new techniques to measure the torque on the shaft at full speed, and understand the different methods is essential to overcome this challenge. We present below the details relating to torque measurements axes in rotation, present the well established literature, and some methods and innovative techniques that allow performing the reading of the torque, whether through direct measurement of the radial deformation either through Measurements by means of the torsion angle. Also featured are initially conventional techniques and a brief historical construction of these methods, and finally the possible consequences that the recent research may have.

Keywords: Torque measurement. Instrumentation. Gauges. Interferometry.

1 Introdução

Ensaio de torção e medições estáticas de torque são técnicas amplamente difundidas na engenharia. Em geral, esses são instrumentos com elevada precisão, e são acessíveis a inúmeras universidades e centros de pesquisas. A maior dificuldade está na medição dinâmica, devido ao constante movimento rotativo e à necessidade inerente de alimentação e de entrada/saída de dados dos sistemas conectados ao eixo, principalmente em aplicações em que se faz necessária a medição em tempo real, a fim de controlar os sistemas ou prever falhas mecânicas e rupturas dos eixos em questão, não sendo possível, portanto, a medição em laboratório.

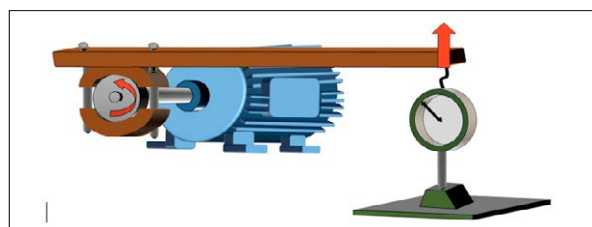
Dessa forma, analisamos os diferentes métodos de medição de torque, observando suas principais vantagens e desvantagens, desde as técnicas mais simples até o estado da arte desse campo específico da instrumentação mecânica.

2 Métodos de medição por absorção

Diferentemente das técnicas de medição de força, que são conhecidas e utilizadas desde a antiguidade, a medição de torque é relativamente recente, já que a necessidade de quantificar o torque de uma máquina rotativa só surgiu em meados do século XVIII, com a revolução industrial e o advento da máquina a vapor (BRITO, 1994).

Nesse período, o físico francês Gaspar de Prony (1755–1839) desenvolveu um método para medir o torque a partir de um sistema de absorção de energia por meio da frenagem de um eixo em rotação. O torque é efetivamente medido por meio de um braço de alavanca de propriedades conhecidas, conectado a um dinamômetro convencional, balança ou outra forma de quantificação de força. Tal técnica ficou conhecida como “freio de Prony” (*Prony brake*) e foi intensamente utilizada nas décadas posteriores. A Figura 1 ilustra esse sistema conectado a uma máquina elétrica.

Figura 1 – Esquema ilustrativo do freio de Prony.

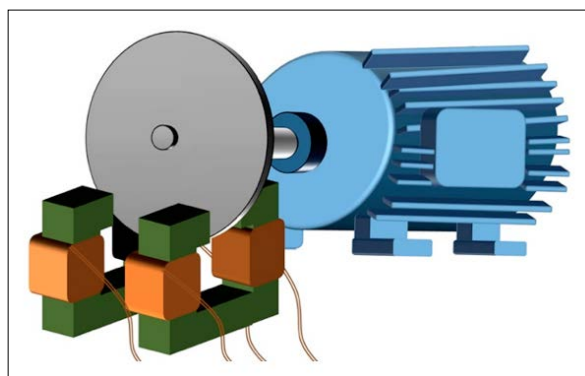


Anos mais tarde, em 1887, o engenheiro inglês Sir Willian Froude (1810–1879) desenvolveu um sistema de absorção baseado em uma frenagem hidráulica, utilizando água. De forma análoga, esse mecanismo ficou conhecido como “freio de Froude” ou “freio à água”, sendo a segunda expressão a mais difundida na literatura. Devido à simplicidade e ao baixo custo, esses sistemas ainda são utilizados para testes e ensaios de torque de máquinas rotativas (BRITO, 1994).

Ainda tratando de medições por absorção, pode-se citar o “freio de Foucault”, baseado em frenagem eletromagnética, devido a correntes indutivas parasitas, sob um disco de material diamagnético acoplado ao eixo (WOHLGEMUTH; ROSA, 2012).

Nesse processo, medem-se a tensão e a corrente nos transformadores estáticos, a fim de mensurar de forma indireta o torque aplicado (PARK *et al.*, 2014; PAUL *et al.*, 2014). Essa ideia foi inicialmente proposta pelo físico francês Jean Bernard Léon Foucault (1819–1868), mas apenas em 1928 pôde ser efetivamente implementada. A Figura 2 ilustra uma montagem desse dispositivo.

Figura 2 – Esquema ilustrativo do freio de Foucault.



3 Métodos de medição por extensômetros de resistências

Os métodos de medição que utilizam extensômetros de resistência elétrica são extremamente difundidos, sendo este o tipo mais comum de sistema de medição e o mais utilizado na medição de forças e tensões, apresentando custo reduzido, facilidade de manuseio e instalação e razoável linearidade durante a medição (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

Em síntese, os extensômetros são elementos resistivos que, ao serem submetidos a um esforço mecânico em uma direção específica, sofrem uma variação no valor de sua resistência elétrica, conforme Equação (1):

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (1)$$

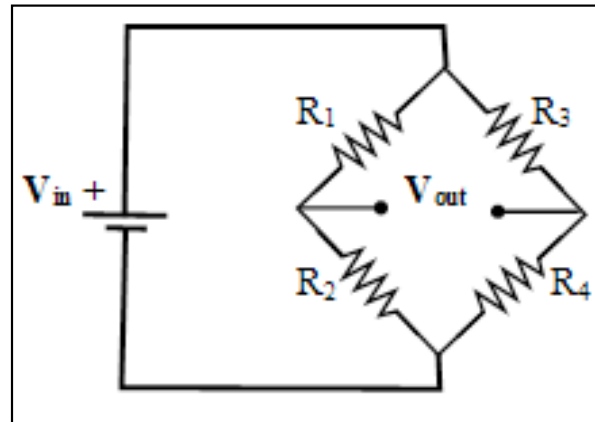
onde k é uma constante de proporcionalidade específica para cada extensômetro, também comumente designada como sensibilidade do extensômetro, e ε é a deformação. É necessário que o extensômetro seja efetivamente fixado à base de uma estrutura. Este elemento é suficientemente pequeno, delgado e, diante de estrutura metálica, apresenta massa desprezível.

Portanto, a peça em análise e o extensômetro são deformados na mesma quantidade após o esforço mecânico. Conhecendo-se o novo valor da resistência desse extensômetro, pode-se concluir a intensidade da deformação da peça. É importante destacar que ainda é necessário fazer compensações na medição em virtude do tipo de material em análise – como o alumínio, o aço, o ferro –, além de correções em função das variações de temperatura, como a deriva térmica, que ocorrem durante o processo (DEVITTE, 2013).

Nem sempre é possível quantificar de maneira exata as deformações, devido às variações de temperatura. Por isso, é comum a ligação dos extensômetros em um arranjo denominado ponte de Wheatstone, já que nessa configuração as medições são comparativas, e como os extensômetros variam todos juntos, pode-se eliminar os efeitos da variação de temperatura. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

A Ponte de Wheatstone foi inicialmente proposta por Samuel Hunter Christie (1784–1865) em 1833, mas foi Sir Charles Wheatstone (1802–1875) que popularizou seu uso, em 1858, com medições de resistências elétricas com alta resolução (FRADEN, 2004). O arranjo de resistores/extensômetros pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Ponte de Wheatstone.

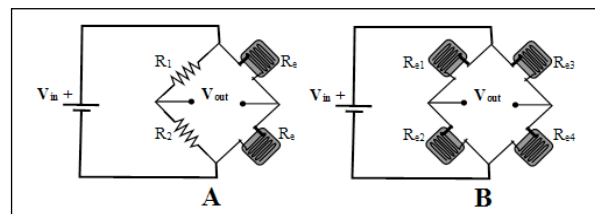


Este circuito deve ser excitado por uma fonte de tensão elétrica de entrada V_{in} . A medição pode ser realizada através da tensão de saída V_{out} . Ao equacionar este circuito, pode-se expressar a tensão de saída V_{out} em função dos resistores inseridos na ponte, conforme Equação 2.

$$V_{out} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_{in} \quad (2)$$

Podemos substituir dois desses resistores por extensômetros. Esse arranjo é conhecido como medição em meia-ponte (Figura 4a). Ao se substituir todos os resistores por extensômetros, temos o arranjo conhecido como ponte completa (Figura 4b).

Figura 4 – Circuitos com extensômetros em meia-ponte (A) e em ponte completa (B).



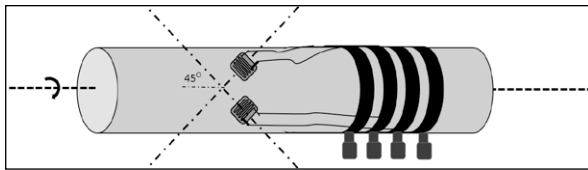
Vale lembrar que os extensômetros indicam a deformação em apenas uma direção específica. No caso de um esforço de tração, deve-se posicionar os extensômetros de modo a medir as deformações axiais. Neste estudo, o nosso interesse se concentra nas deformações devidas aos esforços de torção. Nesse caso, deve-se posicionar os extensômetros de modo a formar 45° em relação à direção axial do eixo, pois é nesta linha de atuação que temos a maior deformação na estrutura. Assim, o torque pode

ser fornecido a partir das equações anteriormente descritas.

É extremamente prático realizar medições de torção utilizando extensômetros em ensaios estáticos de bancada, sendo esta técnica uma das mais difundidas neste campo. Contudo, procedimentos semelhantes se mostram um desafio particular em aplicações de natureza dinâmica (eixo em contínua rotação), devido à necessidade de alimentação da ponte de extensômetros, assim como da correta leitura da variação da tensão elétrica de saída, sendo impossível o uso de fios, já que estes acabariam por enrolar-se no eixo durante o giro.

Inúmeras técnicas já foram empregadas, sendo a mais antiga a utilização de anéis coletores. Tais anéis são fixados radialmente ao eixo em rotação. Escovas de grafite são posicionadas de modo a permitir a alimentação do circuito (tensão de excitação da ponte), bem como a recepção dos sinais de leitura de tensão elétrica. A Figura 5 ilustra como seria o equipamento.

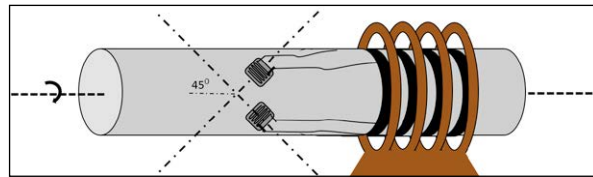
Figura 5 – Medição de torção via anéis coletores.



O sistema com anéis coletores permite que seja possível a medição da torção nos eixos em rotação. Contudo, esse método apresenta inúmeros inconvenientes. O constante desgaste e aquecimento das escovas de grafite reduz a precisão da medição, devido ao aumento de ruído no sistema decorrente dessa zona de contato. O sinal a ser medido é submetido a uma série de junções de materiais diferentes, além do ruído provocado pelo contato entre o anel coletor e as escovas. Além disso, o sistema se torna instável quando submetido a vibrações ou giros em alta rotação (BORGES, 2007; CHEONG *et al.*, 1999).

Sendo assim, têm-se buscado alternativas para a medição de torção utilizando extensômetros diretamente nos eixos. Uma opção bastante difundida é a que utiliza transformadores circulares no lugar dos anéis coletores, eliminando, dessa forma, o problema do contato deslizante. A Figura 6 ilustra esse sistema:

Figura 6 – Medição de torção via transformadores circulares.

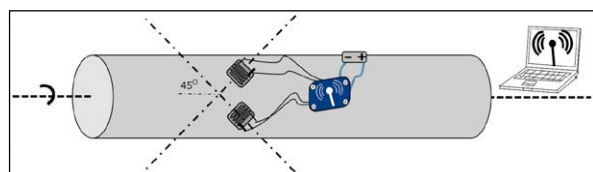


A relação custo/benefício dos transformadores rotativos é questionável em muitas aplicações. A necessidade de rolamentos e a fragilidade do núcleo dos transformadores não aumentam de forma significativa a velocidade máxima de rotação no eixo, além de o sistema ficar susceptível a ruídos e erros causados pelo alinhamento entre as bobinas do transformador, sendo necessário um condicionador de sinais especializado para aumentar a confiabilidade na aquisição de dados. Essas e outras características tornam o sistema bem mais caro que a convencional técnica dos anéis coletores (LIMA FILHO *et al.*, 2011).

Wassermann *et al.* (2005) contornaram esse problema ao utilizarem nesta técnica apenas a alimentação do circuito montado sob o eixo, que, além dos extensômetros, contava com um sistema de transmissão de dados via infravermelho, enviando as informações de variação de tensão sem a necessidade de transformadores ou anéis de contato deslizante, reduzindo bastante os ruídos e outras fontes de erro do sistema.

Bin (2005) já desenvolveu seu trabalho sem a necessidade de transformadores para alimentação. Ele fixou pequenas baterias no eixo, junto com o circuito de medição com extensômetros e o circuito de transmissão de dados. Ao se ter uma fonte de tensão contínua, com baixo ruído e poucas oscilações, é possível realizar uma medição com mais precisão, já que os componentes eletrônicos empregados são bastante susceptíveis a variações dessa natureza. Um esquema desse tipo de aplicação pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Medição de torção via telemetria embarcada.



Oliveira (2010) utilizou extensômetros em conjunto com um sistema de transmissão de rádio UHF ponto a ponto, com frequências na faixa 902 a 928 MHz. Esse sistema foi implementado no estudo experimental do torque no laminador de chapas da USIMINAS. Para alimentação, foi utilizada uma bateria típica de celular, presa ao eixo em conjunto com o sistema telemétrico. Pinheiro (2014) também utilizou circuitos de telemetria com extensômetros para medição do torque e do empuxo de propulsores do eixo da hélice do navio graneleiro *Germano Becker*. Trabalho semelhante foi realizado por Montfort (2014) no mesmo navio, mas com ênfase no torque devido ao deslocamento dos propulsores. Em ambos os casos, a alimentação dos circuitos de medição também foi realizada com baterias fixadas ao eixo.

Pode-se notar uma tendência à medição do torque por meio dos extensômetros em conjunto com sistemas telemétricos de transmissão de dados. Infelizmente, o uso de baterias de forma contínua faz com que seja necessário parar o eixo para que se realize a substituição deste elemento. Em geral, essas baterias são de pequeno porte e não duram períodos elevados de tempo. Baterias com maior durabilidade são necessariamente maiores, o que torna impraticável o seu uso, principalmente em altas rotações.

O trabalho de Lima Filho *et al.* (2011), de forma semelhante, utiliza extensômetros para medição do torque em unidades de bombeio mecânico, com transmissão de dados via Wi-Fi através de um módulo Xbee. Contudo, em seu trabalho não se utilizou bateria para alimentação dos circuitos; ele foi desenvolvido em sistema de autoalimentação, com geração da energia a partir do movimento rotativo do próprio eixo, resolvendo dessa forma as questões da alimentação e da transmissão de dados.

4 Métodos de medição por sensores piezoelétricos e magnético-elásticos

Embora os extensômetros sejam os elementos mais utilizados nas medições de deformações micrométricas, existem também outros elementos que podem atuar como transdutores de deformação. Podemos citar dois deles: os elementos piezoelétricos e os elementos magnético-elásticos.

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, ao estudarem os efeitos da pressão mecânica na geração de carga elétrica pelos cristais de quartzo, esfarelita e turmalina. Contudo, a primeira aplicação em engenharia

de um elemento piezoelétrico ocorreu apenas em 1921, pelo físico francês Paul Langevin (1872–1946), ao desenvolver um sonar baseado em cristais de quartzo. Apenas em 1947 foram utilizados elementos cerâmicos piezoelétricos (VIGINOSKI, 2013).

De forma simplificada, o efeito consiste no deslocamento intrínseco de cargas elétricas ao se aplicar um esforço mecânico sobre o elemento piezoelétrico, aumentando dessa forma o campo elétrico em uma direção específica do material. O efeito também ocorre na interação oposta: ao se aplicar um campo elétrico maior sobre o material (aumentando a tensão elétrica em seus terminais), haverá um deslocamento mecânico de toda a estrutura (FREITAS, 2012). A relação entre a tensão mecânica e o campo elétrico pode ser dada pelas equações acopladas (3):

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & h_E \\ h_E & \epsilon \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma \\ E \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde S designa a deformação, D , a densidade de fluxo elétrico, σ , a tensão mecânica e E , o campo elétrico. Os coeficientes s , h_E e ϵ são, respectivamente, as seguintes propriedades do material: compliança elástica, coeficiente de deformação piezoelétrico e permissividade dielétrica.

Em linhas gerais, a utilização de elementos piezoelétricos apresenta as mesmas dificuldades na medição dinâmica de torque que os extensômetros. Embora não seja necessário alimentar o elemento, já que este gera a própria diferença de potencial ao estar sob pressão mecânica, ainda é necessária a leitura dessa ddp, devendo o projetista recorrer novamente a uma das técnicas anteriormente apresentadas, como os anéis coletores, os transformadores ou a telemetria. Seu uso se torna vantajoso nas medições de deformações extremamente pequenas, nem sempre possíveis de serem mensuradas com os extensômetros convencionais.

Corrêa (2009) utilizou sensores piezoelétricos para medir a vibração e o torque a partir da ondulação do estator de um motor de relutância chaveado. O torque mecânico sobre o eixo foi realizado a partir de frenagem eletromagnética, semelhante ao freio de Foucault.

O elemento piezoelétrico pode ainda ser submetido a torção, juntamente com o eixo. Alguns trabalhos analisam a ddp gerada por essa torção, para indicação do torque sobre o eixo. Podemos citar os trabalhos de Gao e Liu (2011) e de Xing e Xu (2013).

O primeiro elabora um modelo matemático, com uso de equações tensoriais, que é testado experimentalmente nas torções de um elemento piezoelétrico. Já o segundo aplica os sensores diretamente em motores elétricos e determina o torque através do balanço de energia mecânica/elétrica do elemento piezoelétrico sob torção.

Semelhante ao efeito piezoelétrico é o efeito Villari. De forma análoga, ao ser submetido a uma tensão mecânica, o material sofre uma variação em sua magnetização. Esses materiais são comumente chamados de elementos magnético-elásticos.

Também é empregado o termo magnetoestrição, fazendo referência à mudança da magnetização de um material quando submetido a tensões mecânicas. Esse fenômeno foi descoberto por James Prescott Joule (1818–1889), em 1842, mas foi melhor estudado apenas em 1865, pelo cientista italiano Emilio Villari (1836–1904) (SANTOS, 2013).

Os domínios magnéticos dos materiais sofrem rotação devido ao esforço mecânico ao qual estão submetidos. Como o campo magnético total do elemento é a resultante da soma de cada domínio magnético, temos que o campo resultante pode aumentar ou diminuir proporcionalmente à deformação mecânica à qual é submetido (DAPINO, 2002). De forma análoga ao efeito piezoelétrico, podemos acoplar as equações que relacionam o campo magnético e a tensão mecânica da seguinte forma (4):

$$\begin{bmatrix} S \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & h_B \\ h_B & \mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma \\ H \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde S designa a deformação, B , a densidade de campo magnético, σ , a tensão mecânica e H , o campo magnético. Os coeficientes s , h_B e μ são, respectivamente, as seguintes propriedades do material: compliança elástica, coeficiente de deformação da magnetoestrição e permeabilidade magnética do meio.

Podemos observar esse tipo de material sendo utilizado em algumas aplicações de medição dinâmica de torque, como em Garshelis e Jones (1999), que propuseram um transdutor para medição de torque utilizando essa propriedade magnética como principal elemento para medição.

Um pouco depois, Fock (2000) descreveu as fases de planejamento dos transdutores magnético-elásticos em detalhes, a partir da carga mecânica até o sinal de saída elétrica. O artigo descreve o método

de determinação desses parâmetros de sensibilidade como constantes materiais e seus valores para certos materiais magnético-elásticos.

Mais recentemente, temos as publicações de Tan *et al.* (2012) e Pepakayala *et al.* (2014). Ambos os trabalhos trazem os elementos magnético-elásticos em medições de deformações em estruturas mecânicas, mas com foco na flexão e tração em estruturas estáticas, sendo a medição da torção um elemento secundário da medição.

Souza Neto (2009) cita as ligas de níquel-ferro e níquel-cobalto como elementos que apresentam um efeito Villari relativamente alto, tornando possível a realização de medições de torque dinâmico com medidores de campo magnético externos ao eixo. A este elemento, em que o eixo sujeito a torque é o próprio transdutor da informação da tensão mecânica aplicada, chama-se *torqductor*. Para um uso efetivo dessa técnica, o próprio eixo em rotação deve ser fabricado com essas ligas de níquel-ferro e/ou níquel-cobalto, ou com outros materiais que possuam um efeito Villari significativo. Essa exigência para uso da técnica a torna bastante limitada, pois esses materiais não são convencionais em aplicações de engenharia que necessitem de sistemas dinâmicos rotativos.

5 Métodos de medição por ângulo de torção

A teoria que fundamenta a medição por torção demonstra que também é possível obter o valor do torque sobre um eixo a partir da determinação do ângulo decorrente dos esforços de torção (FIGLIOLA; BEASLEY, 2011). Geralmente, são necessários dois sensores, separados por uma distância L' ao longo do eixo. Quanto maior o eixo, e quanto maior for a distância entre os dois sensores, maior a facilidade em realizar a medição. Contudo, nem sempre se tem à disposição eixos relativamente longos ou sensores que possam estar posicionados tão distantes um do outro, pois deformações por flexão e efeitos vibracionais (que se acentuam em eixos longos) podem dificultar a medição. Além disso, não é tarefa simples realizar a medição de ângulos muito pequenos (menores que 5°) sem a ajuda de extensômetros de resistência, o que retorna as dificuldades apresentadas no item anterior.

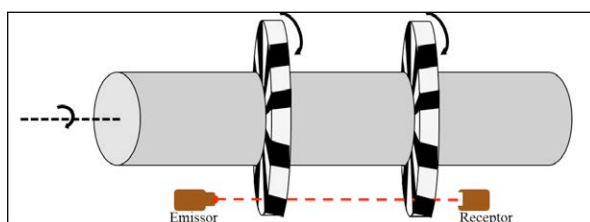
Para sistemas dinâmicos, a medição por ângulo de torção pode ser uma alternativa bastante viável. Na literatura, encontram-se diversos tipos de técnicas.

Alguns métodos de medição são denominados de ópticos, já que utilizam luz em sua medição, sendo os dois principais o método de medição de intensidade de luz e o de medição de defasagem de luz (NASCIMENTO *et al.*, 2000).

No método de medição de intensidade luminosa, são posicionados dois discos, separados a uma determinada distância entre si, ao longo da direção radial do eixo. Os discos alternam regiões transparentes ou vazadas com regiões opacas ou preenchidas. Tais discos devem ser alinhados de forma precisa. Em um dos lados, posiciona-se, de forma estática, um emissor de luz, enquanto do outro lado tem-se um receptor de luz, capaz de quantificar essa intensidade luminosa.

Numa situação sem torção, um feixe de luz atravessa os discos sem atenuação de intensidade. À medida que o torque é aumentado, e, por consequência, o ângulo de torção, temos uma redução na intensidade da luz captada pelo sensor/receptor. Essa redução é proporcional ao torque/ângulo sobre o eixo. A Figura 8 ilustra esse sistema.

Figura 8 – Medição do ângulo de torção via intensidade luminosa.

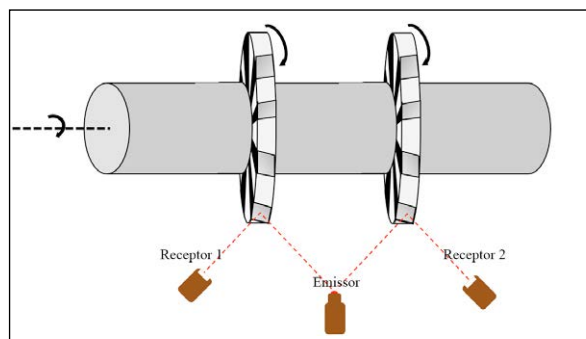


De forma semelhante, podem-se utilizar os mesmos discos, mas com material refletivo, para quantificar o ângulo de torção a partir da defasagem de tempo entre dois pontos originalmente alinhados, mas que, devido à deformação radial, passaram a estar “defasados” no tempo durante uma rotação.

Ilustramos a seguir esse sistema, em que um emissor de luz tipo *laser* a emite para os dois discos. Assim, os discos refletem o sinal sempre que este incide sobre a superfície refletora. Após a torção, uma reflexão ocorrerá primeiro que a outra. De posse dos valores da velocidade angular e da defasagem entre as duas medições, é possível determinar o ângulo de torção e, por consequência, o torque sobre o eixo. Se a emissão do laser for contínua, podem-se utilizar dois emissores, mas se for pulsante, apenas um deve ser utilizado, para garantir a coerência de fase entre

os feixes; além disso, o emissor deve ser simetricamente posicionado, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Medição do ângulo de torção via defasagem do sinal e/ou interferometria.



Em sistemas semelhantes, utiliza-se interferometria para quantificar essa deformação; contudo, esses sistemas são mais caros e bastante sensíveis, sendo pouco utilizados em aplicações industriais.

A medição via defasagem de tempo tem sido a mais empregada nas medições do ângulo de torção a partir de dois pontos distintos ao longo do eixo, sendo a utilização de luz ou laser apenas uma das soluções. Existem ainda sistemas que fazem uso de ultrassom, materiais piezoelétricos e também extensômetros de resistência. Mas todos possuem a característica de necessitarem de dois pontos distantes entre si. Quanto menor for essa distância entre os pontos, mais versátil será o sistema, e mais imune a perturbações mecânicas ele estará.

Por fim, existem ainda sistemas que utilizam sensores de efeito Hall, para medição de campo magnético, ao posicionarem dois ímãs em pontos distintos no eixo. Em geral, esses sensores são do tipo *encoder* e se limitam a processar a informação sobre a presença ou ausência do campo magnético, e a medição do ângulo de torção se realiza da mesma forma: apenas medindo a defasagem temporal entre o pulso emitido do ponto 1 e o pulso emitido do ponto 2.

6 Análises e conclusões

Como foi possível observar, a técnica de medição de torque em eixos rotativos vem evoluindo gradativamente para uma configuração com o mínimo de componentes rotacionando junto com o eixo, como também tem apresentado soluções inovadoras para

realizar a leitura de dados, sendo a telemetria bem difundida no meio industrial.

Contudo, a maior dificuldade continua sendo a alimentação desses componentes, pois nem sempre a aplicação permite o uso de baterias – que devem ser substituídas em algum momento, exigindo a parada total da rotação do eixo – ou de sistemas de autoalimentação – que acabam por ocupar bastante espaço. Nas aplicações em alta rotação, ainda não há soluções recentes para esses procedimentos.

Recentemente, novas técnicas de medição de deformação vêm surgindo de forma a substituir os extensômetros e os elementos piezoelétricos, que necessitam ser eletricamente alimentados para uma correta medição.

O uso de magnetismo vem se mostrando promissor, já que campos magnéticos duradouros podem ser medidos por sensores posicionados fora do eixo e sem rotação.

O uso de determinadas propriedades magnéticas pode ser útil na relação campo magnético *versus* torque, como é o caso do uso do efeito Villari (SANTOS, 2013). O fenômeno de magnetoimpedância gigante tem sido empregado na medição de pressão (LOUZADA, 2006) e, eventualmente, também pode ser implementado nas medições de torque. Há também o procedimento de medição de deformação ocasionada pelo movimento relativo de ímãs fixados a peça (BORGES *et al.*, 2015), que com poucas adaptações também pode ser empregado na medição de torque dinâmico.

No momento atual do estado da arte, vê-se nas propriedades magnéticas dos materiais, e em sua relação com as deformações mecânicas, a possível próxima geração de elementos de medição de torque em eixos rotativos.

REFERÊNCIAS

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentação de Medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Arte e Ideia, 2007.

BIN, M Z. L. Research on torque real time monitoring system of rotary machine. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, v. 26, p. 38-39, 2005.

BORGES, A. N. **Caracterização de escovas de grafite e avaliação do seu desempenho em função da microestrutura**. 2007. 66 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2007.

BORGES, J. C. S.; LIMA FILHO, A. C.; BELO, F. A. Sensor hall effect on analyses mechanical stress. **Journal of Mechanics Engineering and Automation**, v. 5, p. 19-25, 2015.

BRITO, R. M. **Sistema eletro-eletrônico para medição direta de torque em dispositivos girantes utilizando extensômetros de resistência elétrica**. 1994. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1994.

CHEONG, Y. D.; KIM, J. W.; OH, S. H.; LEE, C. W. Analysis and development of the angular twist type torque-meter. **Composite Structures**, v. 47, n. 1, p. 457-462, 1999.

CORRÊA, D. A. P. **Desenvolvimento de uma plataforma digital para a minimização da vibração e da ondulação de torque de um motor de relutância chaveado**. 2009. 168 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

DAPINO, M. J. Magnetostrictive materials. In: SCHWARTZ, M. (Ed.). **Encyclopedia of smart materials**. New York: John Wiley and Sons, 2002. p. 600-620.

DEVITTE, W. **Desenvolvimento de um sistema para medir o conjugado de um motor de indução**. 2012. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Unidade Integrada Vale do Taquari de Ensino Superior, Lajeado, RS, 2013.

FIGLIOLA, R.; BEASLEY, D. **Theory and design for mechanical measurements**. 5. ed. Portland: John Wiley & Sons, 2011. 605 p.

FOCK, K. Design of magnetoelastic transducers. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 17., 2000, Baltimore. **Proceedings...** Baltimore: IEEE, 2000. p. 52-56.

FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications**. 3. ed. New York: Springer, 2004.

FREITAS, R. L. B. **Fabricação, caracterização e aplicações do compósito PZT/PVDF**. 2012. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)

– Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP, 2012.

GAO, C.; LIU, J. Research on the torsion charge sensitivity distribution of piezoelectric quartz disc. **Piezoelectrics & Acousto-optics**, v. 6, n. 3, 2011.

GARSHELIS, I. J.; JONES, C. A. Miniaturized magnetoelastic torque transducers. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 35, n. 5, p. 3649-3651, 1999.

LIMA FILHO, A. C.; BELO, F. A.; SANTOS, J. L. A.; ANJOS, E. G. Self-powered telemetric torque meter. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, v. 133, n. 4, p. 1-7, 2011.

LOUZADA, D. R. **Desenvolvimento de um transdutor de pressão de alta sensibilidade, baseado no fenômeno de magnetoimpedância gigante, para aplicação biomédica**. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MONTFORT, G. **Seleção de sistema propulsivo em cascos de deslocamento: uso de formulações clássicas e resultados de medição**. 2014. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

NASCIMENTO, N.; GERST, E.; MARTO, A. G. Torquímetro para motores ultra-sônicos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2000, Natal, RN. **Anais...** Natal, RN: ABCM, 2000.

OLIVEIRA, J. S. **Avaliação experimental e teórica do torque no laminador de chapas grossas da USIMINAS**. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

PARK, M.-G.; CHOI, J.-Y.; SHIN, H.-J.; JANG, S.-M. Torque analysis and measurements of a permanent magnet type Eddy current brake with a Halbach magnet array based on analytical magnetic field calculations. **Journal of Applied Physics**, v. 115, n. 17, p. 17E707, 2014.

PAUL, S.; BOMELA, W.; PAUDEL, N.; BIRD, J. Z. 3-D eddy current torque modeling. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 50, n. 2, p. 905-908, 2014.

PEPAKAYALA, V.; GREEN, S. R.; GIANCHANDANI, Y. B. Passive wireless strain sensor using

microfabricated magnetoelastic beam elements. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 23, n. 6, p. 1374-1382, 2014.

PINHEIRO, T. P. **Obtenção de torque e empuxo de propulsores através do uso de sistema de medição de eixo por telemetria**. 2014. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS, C. T. **Efeito das adições de boro na magnetostricção de ligas policristalinas dos sistemas Fe-Al e Fe-Ga**. 2013. 179 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, SP, 2013.

SOUZA NETO, B. M. **Desenvolvimento de uma bancada para medição automatizada de potência mecânica em motores elétricos de alta rotação e baixo torque**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado Em Metrologia Científica e Industrial) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

TAN, E. L.; DEROUIN, A. J.; ONG, K. G. Magnetoelastic-harmonic stress sensors with tunable sensitivity. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 6, p. 1878-1883, 2012.

VIGINOSKI, C. L. F. **Sistema utilizando vibração de um transdutor piezoelétrico para medir densidade de um líquido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

WASSERMANN, J.; SCHNEEBERGER, M.; HÖFTBERGER, F.; HOFFMANN, K.; PIRKO, A.; DECKER, K.; SCHNEIDER, M. Wireless data transfer system for rotating machinery - very robust against electromagnetic interference. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SENSING TECHNOLOGY, 1., 2005, Palmerston North, NZ. **Proceedings...** Palmerston North: Massey University, 2005. p. 651-647.

WOHLGEMUTH, A.; ROSA, M. K. **Aprimoramento de uma bancada automatizada de um freio de Foucault utilizada para ensaios de motores de indução**. 2012. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, PR, 2012.

XING, J.; XU, L. Torque for an inertial piezoelectric rotary motor. **The Scientific World Journal**, v. 2013, n. 9, 2013.