

## ESTUDO DE CASO - CÁLCULO DA INCERTEZA ASSOCIADA À MEDIÇÃO DE TORQUE

**Lohanna Ferreira Paiva**

**Odenir de Almeida**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Glória Centro de Pesquisa em Aerodinâmica Experimental – CPAERO, BR 050, km 78, Uberlândia-MG.

lohanna.ufu@gmail; odenir.almeida@ufu.br

**Rosenda Valdés Arencibia<sup>3</sup>**

Universidade Federal de Uberlândia – FEMEC, Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Bloco 5F, Uberlândia-MG. rosenda.arencibia@ufu.br

**Resumo:** Este artigo tem por objetivo avaliar a incerteza de medição associada ao torque pela aplicação do método de GUM e de Monte Carlo. Ao contrário das abordagens bem conhecidas, a incerteza deve levar em consideração os efeitos que atuam durante a medição de torque em aplicações industriais, como bancadas de teste. Estes efeitos incluem os efeitos conhecidos da calibração de laboratório, como histerese, linearidade ou desvio de interpolação, repetibilidade, reprodutibilidade. No decorrer deste trabalho é definindo um modelo matemático, realiza-se a indentificação das ve, do cálculo da contribuição e, por fim, foram feitas sugestões sobre como a incerteza pode ser reduzida para determinadas aplicações.

**Palavras-chave:** Transdutores de torque rotativos, Incerteza de medição, GUM, método de Monte Carlo.

### 1. INTRODUÇÃO

Nas mais diversas aplicações industriais que utilizam máquinas ou sistemas mecânicos, o conhecimento e a avaliação do esforço torcional ao qual está sujeito um determinado componente mecânico ou um conjunto de componentes são fundamentais para o seu dimensionamento e a sua correta utilização (Oliveira, 2015). Para a medição desses esforços, são amplamente utilizados os transdutores de torque. Dentre as possíveis aplicações deste instrumento, destaca-se seu uso em bancada de teste de desempenho de motores, máquinas de torção, bombas hidráulicas e em turbinas eólicas.

O desenvolvimento dos instrumentos e equipamentos utilizados para aplicação e medição de torque na indústria em geral, incluindo suas técnicas de uso e instrumentação, cada vez mais exatas e abrangentes, qualifica a metrologia em torque como uma das áreas da engenharia mecânica em maior desenvolvimento tecnológico e com crescente demanda em serviços de calibração (Oliveira, *et al.*, 2003; Dantas, 2007).

Neste contexto, diferentes padrões e diretrizes de calibração são amplamente utilizados para detalhar os procedimentos e a análise de dados na medição de torque. A ISO 6789 direcionada para ferramentas manuais de torque, foi publicada pela primeira vez em 1982 e nrevisada em 2017 (ISO, 2017a; ISO, 2017b). Para os transdutores de torque, que podem ser considerados a espinha dorsal das medições de torque, as normas DIN 51309 e BS 7882 são as mais utilizadas, sendo suas últimas versões emitidas em 2005 e 2017, respectivamente. Entretanto, é fato que apenas em casos muito raros uma calibração completa de acordo com as normas técnicas DIN 51309 (DIN, 2005) ou EA-10/14 (EURAMET, 2007) é realizada para estes transdutores. Mas, mesmo que uma calibração completa seja planejada, uma estimativa da incerteza de medição geralmente é necessária antes que os componentes estejam disponíveis no *hardware*, durante a fase de cotação ou de projeto. Para tais casos, são necessários métodos que permitam estimativas aproximadas com base nas especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes nas folhas de dados (Wegener e Andrae, 2007).

Assim, para contribuir para a confiabilidade e a rastreabilidade metrológica do resultado das medições é necessário que o sistema de medição seja calibrado e que atenda os limites de erros impostos pelos fabricantes ou normas técnicas. A garantia da rastreabilidade metrológica é um dos requisitos técnicos estabelecidos pela NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017) e esta requer entre outros que a incerteza associada a todos os níveis da cadeia de rastreabilidade seja declarada (INMETRO, 2012). A avaliação e declaração da incerteza de medição é tão importante quanto a apresentação do resultado de medição (Désefant e Priel, 2017). A declaração da incerteza viabiliza que os resultados de medição possam ser comparados, seja entre si ou com valores de referência como manuais do fabricante, *datasheet* de instrumentação ou certificados de calibração (INMETRO, 2012).

Todavia, apesar da importância da calibração periódica de forma a garantir que os resultados de medição sejam confiáveis, é muito comum em indústrias não adquirirem o certificado de calibração ou não os renovar devido ao seu custo, impactando no controle de qualidade e aumentando o risco de decisões errôneas na busca pela melhoria de processos e

produtos. Pode-se acrescentar ainda que muitas vezes os resultados de medição são apresentados de forma incorreta e incompleta porque a incerteza de medição não é avaliada e declarada.

Desta forma, no presente estudo de caso, é avaliada a incerteza de medição de um transdutor de torque TM 307 com faixa nominal de 0,1 – 20,0 N.m com resolução de 0,0001 N.m (Magtrol, 2017), sem certificado de calibração, mas com *datasheet*. Para tanto serão aplicados os métodos GUM e Método de Monte Carlo (MMC) e os resultados obtidos serão comparados. Por fim, serão calculadas as contribuições dos diferentes fatores de influência ou variáveis de entrada na incerteza final para a aplicação do método GUM visando propor boas práticas de medição.

## 2. EFEITOS E PARÂMETROS OBTIDOS DA CALIBRAÇÃO

### 2.1. Aparato experimental

A montagem experimental da medição do torque, Fig. 1, mostra que o torque é obtido diretamente do transdutor de torque TM 307, interligado com seu mostrador digital 3411. Este por sua vez, é acoplado no computador que, por meio do *software* desenvolvido pelo fabricante do transdutor, denominado de Magtrol, permite obter os dados de torque (Silva, 2019). Além disso, foi utilizado um acoplamento MIC-5 também da marca Magtrol S.A, sendo um elemento considerado rígido para o torque e flexível na direção de outros movimentos.

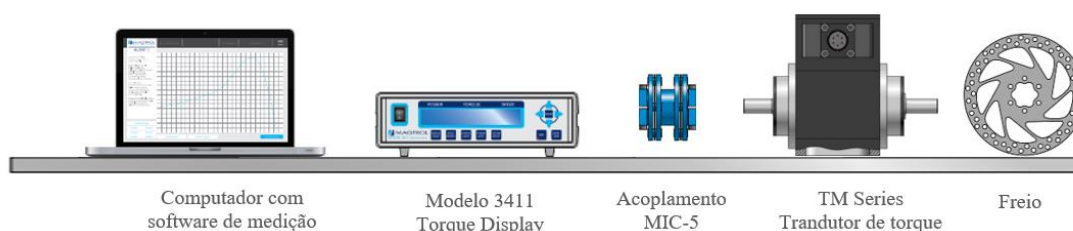


Figura 1. Montagem da bancada experimental

Dessa forma, para medir o torque gerado pela turbina eólica, foi desenvolvido um mecanismo de frenagem utilizando um dispositivo de freio a disco simples de bicicleta (Fig. 1), para aplicar uma força resistiva que permite amortecer lentamente a energia rotacional. A força resistiva seria aplicada até que a turbina eólica parasse completamente e o torque fosse registrado. A potência mecânica ( $P$ ) gerada pela turbina eólica pode ser calculada pela Eq. (1) como:

$$P = T \cdot \omega \quad (1)$$

Na Equação (1),  $T$  é o torque (N.m),  $\omega$  é a velocidade rotacional (rad/s).

Por fim, é importante salientar que o procedimento de medição foi adaptado às especificidades do estudo com capacidade de reprodutibilidade experimental. O procedimento incluiu o seguinte:

- Aumento e diminuição da velocidade do túnel de vento: Foram realizadas medições de torque no túnel de vento a 4 m/s com acréscimos de 2 m/s até a velocidade de 12 m/s, a uma sensibilidade de 10 N.m/ 5 V.
- Medições de torque no sentido crescente e decrescente do mensurando realizadas de forma consecutiva em cinco ciclos;
- A fim de isolar os efeitos de desmontagem e montagem, a posição de montagem não foi alterada durante a realização dos ensaios.
- Temperatura ambiente:  $(23,0 \pm 3,0)$  °C.

### 2.2. Identificação das fontes de incerteza de medição com base na literatura

Primeiramente, foram identificadas as variáveis de entrada ou fatores de influência que contribuem para a incerteza de medição de torque na aplicação dada, Tab. 1. Em seguida devem ser recopiladas todas as informações disponíveis sobre estas variáveis de entrada. Essas informações podem ser encontradas nas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante no *datasheet*, no certificado de calibração ou obtidas experimentalmente.

Tabela 1. Parâmetros (variáveis de entrada) dos transdutores de torque na determinação de incerteza (Adaptado de Dantas (2007), EURAMET (1999), EURAMET (2011), Pratt (2008), Neumann, (2020), Wegener e Andrae, 2007).

| Propriedades/ Quantidade (símbolo)                            | Certificado de calibração     | Datasheet |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------|
| Resolução do transdutor de torque (r)                         | X                             | X         |
| Efeito da temperatura no sinal zero ( $U_{TK_0}$ )            |                               | X         |
| Efeito da temperatura na sensibilidade ( $U_{TK_c}$ )         |                               | X         |
| Histerese: reversibilidade (h)                                | X                             |           |
| Histerese: Erro de histerese ( $U_{hys,max}$ )                |                               | X         |
| Desvio de linearidade/ erro de interpolação ( $f_a$ )         | X                             |           |
| Desvio de linearidade/ erro de interpolação ( $U_{lin}$ )     |                               | X         |
| Linearidade incl. Histerese ( $U_{lh}$ )                      |                               | X         |
| Desvio padrão de repetibilidade ( $\sigma_{rel}$ )            |                               | X         |
| Período de repetibilidade ( $U_{b'}$ )                        | X                             |           |
| Reprodutibilidade ( $U_b$ )                                   | X                             |           |
| Incerteza de calibração/ da sensibilidade ( $U_{KE}$ )        | X                             |           |
| Incerteza de calibração/ da sensibilidade ( $d_c$ )           |                               | X         |
| Histerese do sinal zero (“Remanência mecânica”) ( $U_{rem}$ ) | X                             |           |
| Influência da carga parasita ( $U_{para}$ )                   | X                             |           |
| Influência da velocidade de rotação ( $U_{Veloc}$ )           | X                             |           |
| Influência das partes adaptativas ( $U_{ada}$ )               | Determinado experimentalmente |           |

No caso de valores determinados a partir de uma calibração, a incerteza associada à calibração geralmente é dada como a multiplicação da incerteza padrão combinada pelo respectivo fator de abrangência  $k$ . No caso de valores especificados pelos fabricantes, os valores geralmente são limites superiores com um alto nível de confiança, portanto, nenhum fator de abrangência adicional precisa ser incluído (Wegener e Andrae, 2007).

Para demonstrar a ideia de cálculo, o procedimento é realizado assumindo os seguintes dados de entrada. Esses dados representam um transdutor de torque típico e condições assumidas em uma bancada de teste de potência típica. Supõe-se que a incerteza deve ser estimada sem ter um certificado de calibração para o transdutor individual (por exemplo, durante a fase de projeto). Portanto, todas as contribuições devem ser baseadas nas especificações do fabricante. Assim, a Eq. (2) representa a incerteza total, incluindo todos os efeitos listados, é

$$U(T) = \sqrt{U_r^2 + U_{TK_0}^2 + U_{TK_c}^2 + U_{lh}^2 + U_{b'}^2 + U_b^2 + U_{KE}^2 + U_{rem}^2 + U_{para}^2 + U_{vel}^2 + U_{ada}^2} \quad (2)$$

Entretanto, dependendo das circunstâncias individuais, a contribuição da incerteza pode vir de outras fontes além das listadas, e algumas das opções acima podem não ser relevantes em todas as situações (Pratt, 2008). No caso desse estudo, nem todos os efeitos listados acima podem ser considerados no cálculo. Como o transdutor de torque utilizado não possuía certificado de calibração, foram descartados os efeitos de desvio de reversibilidade, erro de interpolação/ desvio de linearidade ( $f_a$ ), período de repetibilidade, reprodutibilidade, influência de calibração/ de sensibilidade ( $U_{KE}$ ), histerese do sinal zero, influência do carregamento parasita, influência da velocidade de rotação e influência das partes adaptativas, que são parâmetros não mostrados pelo *datasheet*. Isso se deve ao fato que resultados da calibração são expressos em relação ao passo de torque real, enquanto as especificações do fabricante geralmente são dadas em relação à faixa total do equipamento.

A HBM (2022) define que o efeito da temperatura sobre o sinal de zero ( $U_{TK_0}$ ) é a variação, devido à mudança de temperatura de 10 K, do sinal de saída do transdutor descarregado referida à constante nominal. O valor especificado é o máximo que pode ocorrer na escala de temperatura nominal. O efeito da temperatura sobre o sinal de zero (também chamado de coeficiente de temperatura do sinal de zero) é determinado mediante a medição da variação do sinal de saída do transdutor descarregado, causada por uma variação de temperatura de 10 K, depois de se estabelecer um estado de temperatura estacionário. Neste caso, a temperatura decisiva é a temperatura do transdutor. Como o termo-higrômetro

digital HTC-2A presente no Centro de Pesquisa em Aerodinâmica Experimental (CPAERO), onde foram realizadas as medições, não indicou variações maiores que 10 K no período do experimento, estando dentro do desvio máximo estabelecido pelo fabricante de  $TK_0 \leq 0,1 \%$ .

No caso da temperatura relevante para o cálculo do efeito da temperatura do valor característico ( $TK_C$ ) é a temperatura do transdutor, não do ambiente. Esta temperatura depende da temperatura ambiente, do calor gerado pelas máquinas no sistema (por exemplo, motores de combustão, dinamômetros elétricos ou motores) e da condução de calor no sistema (Oliveira, 2015). Dessa forma, para determinar essa temperatura, as medições da temperatura devem ser feitas em componentes individuais dos eixos rotativos ou uma estimativa matemática complexa é necessária, o que não se aplica ao estudo aqui realizado. Como o experimento está sendo feito dentro da escala de temperatura nominal e não ultrapassa 10 K de variação ao longo das medições, esse parâmetro também pode ser desconsiderado.

O desvio da linearidade incluindo histerese é importante dado que, normalmente, em um ajuste da cadeia de medição, a curva característica é presumida em forma de reta. O efeito máximo é alcançado quando um transdutor empregado em um campo muito amplo de cargas (no caso mais extremo, do torque zero até o torque nominal).

Por sua vez, as cargas parasitárias são talvez a parcela mais complexa de se estimar. Para obter este efeito quantitativamente, são necessárias as tolerâncias para esses erros geométricos e os coeficientes de rigidez (em particular, rigidez à flexão) dos componentes do eixo e da influência dos rolamentos. Entretanto, elas dependem das pré-tensões de desalinhamento e excentricidade geométrica. Além disso, esta situação também está sujeita a deformações térmicas na geometria. Portanto, as cargas parasitas podem mudar dependendo das condições de operação. A segunda fonte geral de cargas parasitas são as forças dinâmicas geradas pelo desequilíbrio. Eles dependem do desequilíbrio residual, da rigidez e da situação do rolamento e da velocidade. Novamente, uma estimativa matemática requer modelos matemáticos bastante complexos. Mesmo se as medições de vibração forem possíveis, elas geralmente fornecerão deflexões, velocidades, acelerações ou tensões locais em certos pontos de medição (Oliveira, 2015). Portanto, mesmo neste caso, alguma modelagem mecânica complexa é necessária para determinar as cargas parasitas, que não é o objetivo desse estudo.

Os valores de incerteza individuais estão listados na Tab. 2. Além disso, as classificações na tabela a seguir se aplicam a todos os modelos de transdutor de torque padrão TM 301 – 308, a menos que indicado de outra forma.

Tabela 2. Especificações técnicas de um transdutor de torque (Magtrol, 2011; HBM, 2020; Wegener e Andrae, 2007)

|                  | Grandeza                               | Estimativa                                      |
|------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $M_{nom}$        | Torque nominal                         | 10 N.m                                          |
| $T_{ref}$        | Temperatura de referência              | 23,0 °C                                         |
| $d_c$            | Tolerância a sensibilidade             | 0,5 % · $M_{nom}$                               |
| $TK_0$           | Efeito da temperatura no sinal zero    | 0,1 % · $M_{nom} \cdot \Delta T / 10 \text{ K}$ |
| $TK_C$           | Efeito da temperatura na sensibilidade | 0,2 % · $M \cdot \Delta T / 10 \text{ K}$       |
| $d_{lh}$         | Linearidade com histerese              | 0,1 % · $\Delta M_{nom}$                        |
| $\sigma_{rel}$   | Desvio padrão de repetibilidade        | 0,02 % · $\Delta M_{nom}$                       |
| $b_{Mb,para}$    | Influência do momento fletor parasita  | 0,03 % · $\Delta M_{nom}$                       |
| $M_{b,para,ref}$ | Momento de flexão de referência        | 1450 N.m/rad                                    |

onde,  $M$  é o torque médio mensurado,  $\Delta T$  a diferença da faixa de operação de temperatura estabelecida no *datasheet*, no caso 10 °C – 60 °C.

### 2.3. Método de GUM para cálculo de incerteza

A incerteza associada ao torque medido com o transdutor de torque pode ser dada em unidades de torque (N.m), saída de sinal elétrico (mV/V) (V) ou como um valor relativo em porcentagem (%). Para o propósito deste artigo, os valores em unidades de torque serão utilizados. Dessa forma, para um torque mensurado  $T$ , uma incerteza padrão combinada  $u_c$  é calculada a partir da aplicação da lei de propagação de incertezas no modelo matemático apresentado na Eq. (2). Entretanto, como não se dispõe de informação sobre todas as variáveis de entrada presente na Eq. (2) este foi simplificado, resultando na Eq. (3).

$$T = \bar{T} + \Delta r + \Delta TK_C + \Delta lh + \Delta KE \quad (3)$$

Aplicando a lei de propagação de incertezas na Eq. (3) é possível calcular a incerteza padrão combinada associada ao torque, Eq. (4). Vale ressaltar que neste caso, todas as derivadas parciais são unitárias.

$$u_c(T) = \sqrt{\bar{T}^2 + u_r^2 + u_{TK_C}^2 + u_{lh}^2 + u_{KE}^2} \quad (4)$$

Para calcular a incerteza padrão associada à variabilidade das leituras de torque foi efetuada uma avaliação do Tipo A, Eq. (5). Neste caso é adotada a distribuição T-student e  $n - 1$  graus de liberdade. Nesta equação  $s$  é o desvio padrão associado aos valores de torque.

$$u(\bar{T}) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (5)$$

Em relação a incerteza padrão associada à resolução do transdutor de torque, adotou-se uma avaliação do tipo B, visto que não pode ser estimada estatisticamente. Considerou-se uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade, Eq. (6):

$$u(\Delta r) = \frac{r}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (5)$$

Segundo Vuolo (1996), na falta de informações detalhadas contidas no certificado de calibração, faz com que a incerteza associada à calibração pode ser estimada como a menor divisão ou menor leitura que é explicitamente indicada pelo instrumento de medida. Dessa forma, este autor recomenda estimar a incerteza associada à calibração como sendo um múltiplo da resolução do instrumento considerando um fator de abrangência  $k = 2,00$ , a distribuição normal de probabilidades e infinitos graus de liberdade efetivos, como mostrado na Eq. (6).

$$u(\Delta KE) = 2 \cdot \frac{r}{k} \quad (6)$$

Para as demais variáveis de entrada, a incerteza padrão foi calculada por meio de uma avaliação do Tipo B. Foi adotada uma distribuição retangular e infinitos graus de liberdade.

Com isso, a incerteza padrão combinada  $u_c(T)$  pode ser expressa da seguinte forma na Eq. (7):

$$u_c^2(T) = \left(\frac{\partial T}{\partial \bar{T}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{T}) + \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta r}\right)^2 \cdot u^2(\Delta r) + \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta TK_C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta TK_C) + \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta lh}\right)^2 \cdot u^2(\Delta lh) + \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta \sigma_{rel}}\right)^2 \cdot u^2(\Delta \sigma_{rel}) + \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta KE}\right)^2 \cdot u^2(\Delta KE) \quad (7)$$

A incerteza expandida pode ser obtida pela Eq. (8), onde  $k(T)$  é determinado em função do número de graus de liberdade efetivo associados à medição de torque obtido pela Eq. (9), e extraído da Tabela de Distribuição t-Student para um nível de confiança de 95 %.

$$U(T) = k(T) \cdot u_c(T) \quad (8)$$

Para determinar o valor do fator de abrangência, deve ser utilizada a tabela da distribuição t de Student. O número de graus de liberdade efetivo ( $v_{ef}$ ) deve ser determinado pela Eq. (9), onde  $u_c(T)$  corresponde à incerteza padrão combinada do torque e  $u_i(x_i)$  representa a incerteza padrão das variáveis de entrada.

$$v_{ef} = \frac{u_c^4(T)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(x_i)}{v_i}} \quad (9)$$

Por fim, a contribuição percentual de cada fonte de incerteza  $x_i$  pode ser obtida pela Eq. (10), onde  $u(x_i)$  é a incerteza padrão,  $C(x_i)$  é o coeficiente de sensibilidade correspondente e  $u_c(y)$  é a incerteza padrão combinada associada à variável de saída (Resende *et al.*, 2019).

$$Cont(x_i) = \frac{u^2(x_i) \cdot C^2(x_i)}{u_c^2(y)} \quad (10)$$

## 2.4. Método de Monte Carlo para cálculo de incerteza

O MMC utiliza das mesmas informações que o método GUM, para isso, deve-se definir os fatores de contribuição segundo um modelo matemático, são gerados valores randômicos de acordo com a distribuição probabilística de cada uma e computados de acordo com o modelo, a fim de simplificar o cálculo da propagação das incertezas. Este método

tem sido muito utilizado atualmente devido a facilidade em realizar as simulações nos computadores pessoais e pela capacidade de automatização do cálculo de incerteza para outros casos semelhantes (INMETRO, 2008).

As primeiras etapas na aplicação do método de MMC são iguais às detalhadas no GUM até a determinação da incerteza padrão associada às variáveis de entrada. Posteriormente, são identificadas as funções densidade de probabilidades referentes a cada variável de entrada (gaussiana, retangular, triangular, etc.). Cada função densidade de probabilidade (FDP) tem um intervalo no qual seu limite inferior é definido pelo valor mais provável da fonte subtraído da sua respectiva incerteza estimada, e o seu limite superior é calculado pelo valor mais provável da mesma fonte de entrada adicionado da sua estimativa da incerteza (Faria, 2016).

No presente trabalho foram realizadas 200 000 iterações conforme a distribuição probabilística de cada fator de entrada de incerteza utilizando o *software* Excel®. Para a variável de entrada variabilidade das leituras foi considerada a distribuição normal e para todas as outras a distribuição retangular.

De posse dos valores simulados de torque foi construído o histograma para verificar se a FDP resultante é normal. São calculados ainda a skwenes e a kurtosis. Por fim foram calculados a média e o desvio-padrão dos valores simulados do mensurando (INMETRO, 2008).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 mostra os valores de torque (N.m.) obtidos para cada teste, além de suas respectivas médias e desvio-padrão

| Velocidade (m/s) | Testes         |                |                |                |                |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> |
| 4                | 0.003          | 0.013          | 0.028          | 0.040          | 0.100          |
| 6                | 0.005          | 0.015          | 0.027          | 0.060          | 0.100          |
| 8                | 0.002          | 0.013          | 0.031          | 0.045          | 0.096          |
| 10               | 0.007          | 0.018          | 0.026          | 0.055          | 0.094          |
| 12               | 0.005          | 0.017          | 0.032          | 0.040          | 0.120          |
| Média            | 0.0044         | 0.0152         | 0.0288         | 0.0480         | 0.1020         |
| Desvio-padrão    | 0.0019         | 0.0023         | 0.0026         | 0.0091         | 0.0104         |

A Tabela 4 mostra as informações e os resultados obtidos durante a avaliação da incerteza de medição associada ao torque medido no túnel de vento na velocidade de 4 m/s. A partir da Tab. 3 o resultado da medição neste caso pode ser expresso como:  $0,0020 \pm 0,0006$  N.m. para uma probabilidade de abrangência de 95 % e um fator de abrangência  $k = 2,78$ . A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a variabilidade das leituras, com uma contribuição de 91,6 %, devido a vibração da bancada por causa da rotação em alta velocidade do rotor.

Tabela 4. Incerteza associado ao torque medido no tunel de vento ns diferentes velocidades – Método GUM.

| Grandeza                                     | Estimativa<br>N.m | DP         | TA | GL       | CS | u (N.m)   | Contribuição<br>(%) |
|----------------------------------------------|-------------------|------------|----|----------|----|-----------|---------------------|
| $\bar{T}$                                    | 0,0020            | t-Student  | A  | 4        | 1  | 0,0001910 | 91,6                |
| $r$                                          | 0,0001            | Retangular | B  | $\infty$ | 1  | 0,0000290 | 2,1                 |
| $TK_C$                                       | 0,2 % de T        | Retangular | B  | $\infty$ | 1  | 0,0000023 | 0                   |
| $d_{lh}$                                     | 0,1 % de T        | Retangular | B  | $\infty$ | 1  | 0,0000011 | 0                   |
| $\sigma_{rel}$                               | 0,2 % de T        | Retangular | B  | $\infty$ | 1  | 0,0000023 | 0                   |
| KE                                           | 0,0001            | Normal     | B  | $\infty$ | 1  | 0,0000500 | 6,3                 |
| Incerteza Padrão Combinada – $u_c(T)$ em N.m |                   |            |    |          |    |           | 0,0002000           |
| Graus de Liberdade Efetivo – $v_{ef}$        |                   |            |    |          |    |           | 4,00                |
| Fator de Abrangência – $k$                   |                   |            |    |          |    |           | 2,78                |
| Incerteza Expandida – $U(T)$ em N.m          |                   |            |    |          |    |           | 0,0005556           |

\*Graus de Liberdade (GL.) e Coeficiente de Sensibilidade (CS.).

De forma similar foi calculada a incerteza para todos os ensaios realizados. Os principais resultados são mostrados na Tab. 5.

Tabela 5. Incerteza associado ao torque medido no tunel de vento nas diferentes velocidades. Método GUM.

| Grandeza                                       | u (N.m)          |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                                | T1=0,0200<br>N.m | T2=0,0065<br>N.m | T3=0,0091<br>M.m | T4=0,0181<br>M.m | T5=0,0247<br>N.m |
| $\bar{T}$                                      | 0,0001910        | 0,0005150        | 0,0004510        | 0,0006508        | 0,0006317        |
| $r$                                            | 0,0000289        | 0,0000289        | 0,0000289        | 0,0000289        | 0,0000289        |
| $TK_c$                                         | 0,0000023        | 0,0000067        | 0,0000105        | 0,0000209        | 0,0000285        |
| $d_{lh}$                                       | 0,0000011        | 0,0000033        | 0,0000053        | 0,0000104        | 0,0000143        |
| $\sigma_{rel}$                                 | 0,0000023        | 0,0000067        | 0,0000105        | 0,0000209        | 0,0000285        |
| KE                                             | 0,0000500        | 0,0000500        | 0,0000500        | 0,0000500        | 0,0000500        |
| Incerteza Padrão Combinada – $u_c(T)$ em N.m   | 0,0002000        | 0,0005180        | 0,0004550        | 0,0006541        | 0,0006357        |
| Graus de Liberdade Efetivo – $v_{ef}$          | 4,00             | 4,00             | 4,00             | 4,00             | 4,00             |
| Fator de Abrangência – k                       | 2,78             | 2,78             | 2,78             | 2,78             | 2,78             |
| Incerteza Expandida – U (T) em N.m             | 0,0005556        | 0,0014403        | 0,0012648        | 0,0018185        | 0,0017674        |
| Contribuição da variabilidade das leituras (%) | 91,6             | 98,7             | 98,3             | 99,0             | 98,7             |

A partir da Tabela 4 tem-se que o resultado da medição de torque para um fator de abrangência  $k=2,78$  e confiabilidade de 95 %. De probabilidade de abrangência é para as diferentes velocidades, respectivamente:

$$T_1 = 0.0200 \pm 0.0006 \text{ N.m}$$

$$T_2 = 0.0065 \pm 0.0015 \text{ N.m}$$

$$T_3 = 0.0091 \pm 0.0013 \text{ N.m}$$

$$T_4 = 0.0181 \pm 0.0019 \text{ N.m}$$

$$T_5 = 0.0247 \pm 0.0018 \text{ N.m}$$

Pode-se observar na Tab. 5 que a variabilidade das leituras é responsável pela maior contribuição na incerteza final. Ainda, esta contribuição aumentou com o aumento da velocidade de 4 para 6 m/s permanecendo praticamente constante para as demais velocidades. Este fato pode ser justificado pela velocidade de *cut-in* (tipicamente ocorre entre 2,5 a 4 m/s), que é quando as lâminas começam a girar e gerar energia (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2022). Isso ocasionou em um aumento da dispersão dos valores do mensurando e consequentemente a uma perda de repetibilidade. Uma prática que pode ser adotada para diminuir esta contribuição é aumentar o número de medições de torque. Desta forma a incerteza final também será reduzida.

A Tab. 6 mostra uma comparação entre os valores de incerteza padrão combinada e expandida associados ao torque obtidos pelos métodos GUM e MMC. A Fig. 2 mostra o histograma dos valores simulados de torque para  $T_1$ . Observa-se que este tem um formato similar à distribuição normal com skweness e curtoses de 0,0082 e 3,0082, respectivamente. Histogramas similares foram obtidos para todas as outras condições avaliadas.

Tabela 6. Valores de incerteza padrão combinada e expandida associados ao torque obtidos pelos métodos GUM e MMC, em N.m.

| Método aplicado | T <sub>1</sub> |         | T <sub>2</sub> |         | T <sub>3</sub> |         | T <sub>4</sub> |         | T <sub>5</sub> |         |
|-----------------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                 | $u_c(T)$       | U(T)    | $u_c(T)$       | U(T)    | $u_c(T)$       | U(T)    | $u_c(T)$       | U(T)    | $u_c(T)$       | U(T)    |
| GUM             | 0,00020        | 0,00055 | 0,00052        | 0,00144 | 0,00046        | 0,00127 | 0,00065        | 0,00182 | 0,00064        | 0,00177 |
| MMC             | 0,00020        | 0,00040 | 0,00052        | 0,00104 | 0,00046        | 0,00100 | 0,00065        | 0,00131 | 0,00064        | 0,00127 |

A partir da Tab. 6 se conclui que a incerteza padrão associada ao torque é similar para os dois métodos. Por sua vez, os valores de incerteza são maiores para o GUM porque em todos os casos o fator de abrangência é 2,78. Já para o MMC o fator de abrangência é 2,00.

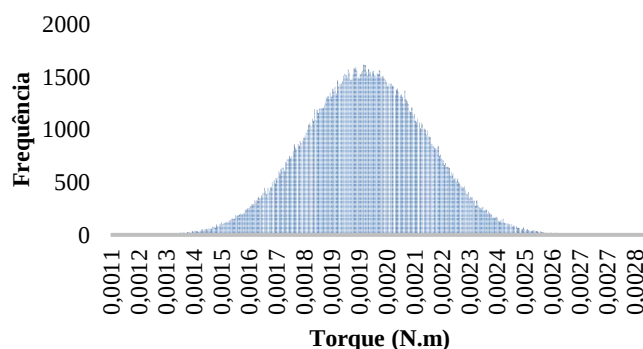


Figura 2. Histograma dos valores simulados de torque para  $T_1$ .

#### 4. CONCLUSÕES

A incerteza associada à medição do torque foi estimada conforme recomendado pelo ISO GUM e MMC. Os valores encontrados variam entre  $0.0200 \pm 0.0006$  e  $0.0247 \pm 0.0018$  N.m. para os experimentos, sendo  $T_1$  o menor e  $T_5$  o maior, considerando uma probabilidade de abrangência de 95 %. Os resultados obtidos demonstram uma tendência típica para a importância das contribuições individuais: A maior contribuição individual é a incerteza causada pela variabilidade das leituras ( $U_{\bar{T}}$ ), chegando a 91,6 %.

Como os demais parâmetros tiveram uma contribuição mínima no cálculo da incerteza, este poderia ter sido mais simplificado. Neste contexto, propõe-se, para melhorar a incerteza de medição, baseada pela experiência prática deste estudo, algumas abordagens para boa prática experimental.

A respeito da incerteza  $U_{KE}$ , pode ser facilmente reduzida com uma calibração adequada, diminuindo sua contribuição. Todavia, tem-se a necessidade da determinação mais precisa das propriedades do transdutor, que pode ser realizada por uma calibração de acordo com altos padrões. Uma otimização adicional da informação pode ser alcançada, quando a faixa de calibração é adaptada à faixa em que o transdutor será usado. Mesmo no pior caso, quando um transdutor individual não é melhor do que especificado pelo fabricante, isso levará a melhores resultados na estimativa. Por exemplo o efeito de repetibilidade é reduzido, quando a linha característica é baseada na média de várias medições do mesmo torque.

Além disso, é necessário otimizar as condições físicas na aplicação, exemplos para tal medidas são: O isolamento de temperatura pode reduzir o fluxo de calor da máquina de acionamento ao transdutor. Assim, a temperatura na sensibilidade ( $U_{TK_c}$ ) podem melhorar, caso haja grandes variações na temperatura ambiente. Mesmo não sendo abordada neste estudo por ser um parâmetro determinado por certificado de calibração, as cargas parasitas também podem ser reduzidas por projetar a bancada de teste apropriadamente. As peças de adaptação podem ser concebidas de forma equivalente às usadas durante a calibração, alternativamente a calibração pode ser realizada com a adaptação original peças (como, por exemplo, na calibração no local).

Outra medida de melhoria dos processos metrológicos, é observar os efeitos que não estão diretamente relacionados com as propriedades da medição de torque dispositivo. Exemplos disso, são as execuções de teste com eixo desconectado ou mau acoplado, vindo a resultar em vibrações que podem influenciar na leitura do torque, ou colocar o sistema em um regime de trabalho que possa gerar a mesma consequência.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Albertazzi, A.; Sousa, A. R. de. Fundamentos de metrologia científica e industrial. Barueri: Editora Manole, 2008.
- BS 7882:2017, Method for calibration and classification of torque measuring device.
- Dantas, A. B. Desenvolvimento e avaliação de padrão de torque para calibração de torquímetros em três faixas de medição. Tese (Mestre em Engenharia Mecânica). 122f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Natal, 2007.
- de SOUSA, G. G. P., SOARES JÚNIOR, L. Aplicação da simulação de monte Carlo no cálculo da incerteza de medição. Extensão em ação, Fortaleza, v.1, n. 10, Jan/Jun 2016
- Désenfant M, Priel M (2017) Reference and additional methods for measurement uncertainty evaluation. Measurement 95:339–344. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.022>

- DI/VDE/DGQ (Verein Deutscher Ingenieure et al), VDI/VDE/DGQ Directive 2618, Prüfmittelüberwachung – Anweisungen zur Überwachung von Messmitteln für geometrische Größen – Messunsicherheit (Ispezione delle apparecchiature di misura e prova – Istruzioni per l’ispezione delle apparecchiature di misura e prova per grandezze geometriche – Incertezza di misura), 2005.
- DIN (German Standards Institute), DIN 51309 Werkstoffprüfmaschinen – Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente/Materials Testing Machines – Calibration of static torque measuring devices.
- EA (European co-operation for Accreditation), EA-10/14, EA Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices
- EURAMET (European Association of National Metrology Institutes). Publication EA-4/02, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, 1999.
- \_\_\_\_\_. Publication EURAMET/cg-04/v.2.0, Uncertainty of Force Measurements, 2011. (previous name of Directive: EA-10/04)
- Faria, V. N. R. Avaliação da incerteza de medição no setor médico-hospitalar. 2016. 170f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Fusco, N. M. B. Ambiente de simulação para aplicação a Sistema de garantia metrológica de laboratórios de calibração e ensaios. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <  
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/129168/327881.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 28 nov. 2022.
- Hesse, T.; Wegener, G.; Müller, D.; Ferrero, C.. (2020). How to determine the measurement uncertainty in torque field in the practical way. 10.13140/RG.2.2.31917.92644.
- How Do Wind Turbines Survive Severe Storms? Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2022. Disponível em: <  
<https://www.energy.gov/eere/articles/how-do-wind-turbines-survive-severe-storms>>. Acesso em: 05 jan. 2023
- INMETRO. A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo. INMETRO-DIMCI-DIMEC-LAPRE INMETRO. Nota técnica, 2008.
- INMETRO, Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. Rio de Janeiro, Brasil, 2012, 95p.
- International Organization for Standardization. (2017). Assembly tools for screws and nuts – Hand torque tools – Part 1: Requirements and methods for design conformance testing and quality conformance testing: minimum requirements for declaration of conformance (ISO Standard No. ISO 6789-1:2017). <https://www.iso.org/standard/62549.html>
- \_\_\_\_\_. (2017). Assembly tools for screws and nuts - Hand torque tools - Part 2: Requirements for calibration and determination of measurement uncertainty. (ISO Standard No. ISO 6789-2:2017). <https://www.iso.org/standard/62550.html>
- \_\_\_\_\_. (2017) ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- Pratt, B. C. The calculation of uncertainty of the calibration results for a torque measuring device calibrated to British Standard BS 7882: 2008. Nobar Torque Tools Ltd, Oxfordshire, 2008.
- LINK, Walter. Metrologia mecânica: Expressão da incerteza de medição. Rio de Janeiro: Programa RH-Metrologia, 1997.
- MAGTROL. TM 300 Series In-Line Torque Transducers User’s Manual. 1. ed. Friburgo, Suíça, 2017. Revisão H.
- MAGTROL, User’s manual: TM 300 series on-line torque transducers. 1. ed., 2011. Revisão G. Disponível em: <http://www.magtrol.com/manuals/tm300manual.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2022.

- Neumann, C. M. Método de calibração para instrumentos de medição utilizados na indústria metal-mecânica: manômetro, micrômetro externo e torquímetro. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Departamento de Ciências Exatas e Engenharia, Panambi, 2020.
- Resende, P.; Arencibia, R.; Siqueira, I.; Silva, M. B. Aplicação do Método GUM no Cálculo de Incerteza de Medição da Força de Corte no Torneamento, 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), 2019. DOI: 10.26678/ABCM.COBEF2019.COF2019-0551
- Oliveira, R. S. Fundamentos para padronização metrológica da grandeza torque dinâmico. 245 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Industrial). Universidade Federal da Bahia, Escola politécnica, Salvador, 2015.
- Silva, J. L. G. da. Determinação experimental do número de potência de impelidores de pás retas. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 2019.
- Senstel. Special Torque Transducers. Disponível em: <<http://www.sensel.co.uk/images/highspeedtorquesensors.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2022
- Wegener, G., & Andrae, J. (2007). Measurement uncertainty of torque measurements with rotating torque transducers in power test stands. *Measurement*, 40(7-8), 803–810. doi:10.1016/j.measurement.2006.0

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

## CASE STUDY - CALCULATION OF UNCERTAINTY ASSOCIATED WITH TORQUE MEASUREMENT

**Lohanna Ferreira Paiva**

**Odenir de Almeida**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Glória, Experimental Aerodynamics Research Center – CPAERO, BR 050, km 78, Uberlândia-MG.

lohanna.ufu@gmail; odenir.almeida@ufu.br

**Rosenda Valdés Arencibia**

Universidade Federal de Uberlândia – FEMEC, Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Bloco 5F, Uberlândia-MG. rosenda.arencibia@ufu.br

**Abstract:** *This article aims to evaluate the measurement uncertainty associated with torque by applying the GUM and Monte Carlo method. Unlike well-known approaches, the uncertainty has to take into account the effects that act during torque measurement in industrial applications such as test benches. These effects include the so-called laboratory calibration effects such as hysteresis, linearity or interpolation drift, repeatability, reproducibility. In the course of this work, a mathematical model is defined, the identification of the ve, the calculation of the contribution is carried out and, finally, suggestions were made on how the uncertainty can be reduced for certain applications.*

**Keywords:** Rotary torque transducers, Measurement uncertainty, GUM, Monte Carlo Method.

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.