



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA
CALIBRAÇÃO DE CALBRADOR DE TORQUÍMETROS
UTILIZADOS NA INTEGRAÇÃO DE SATÉLITES**

Dianne Cristina Rodrigues

São José dos Campos - SP

2017

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA
CALIBRAÇÃO DE CALIBRADOR DE TORQUÍMETROS
UTILIZADOS NA INTEGRAÇÃO DE SATÉLITES**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE/CNPq)**

Dianne Cristina Rodrigues (ETEP, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: dianne.rodrigues@lit.inpe.br

Dr. Ricardo Suterio (LIT/INPE, Orientador).

E-mail: suterio@lit.inpe.br

COLABORADORES

Angela Akemi Tatekawa Silva (LIT/INPE)

Julho de 2017

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
1.1. Justificativa.....	7
1.2. Contextualização	7
1.3. Objetivo	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1. Medição.....	9
2.2. Metrologia	10
2.2.1. O desenvolvimento da metrologia	11
2.2.2. Metrologia no Brasil	11
2.3. Calibração.....	13
2.4. Metrologia em torque	15
2.4.1. Definição de torque.....	15
2.5. Validação de métodos	16
2.5.1. Critérios de decisão.....	17
2.5.1.1. Erro relativo (ER)	17
2.5.1.2. Índice z (z-score)	17
2.5.1.3. Erro normalizado (EN)	18
3. METODOLOGIA.....	19
3.1. Desenvolvimento.....	20
4. RESULTADOS	22
4.1. Resultados obtidos na validação do método.....	22
5. CONCLUSÃO.....	26
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Demonstração do sistema.....	8
Figura 2 – Demonstração completa do sistema.....	19
Figura 3 – Sistema funcionando	20
Figura 4 – Sistema de nivelamento	23
Figura 5 – Sistema com o carrinho hidráulico.....	24
Figura 6 – Gráfico: Incerteza expandida da calibração no transdutor 5 S.H.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relações entre as unidades de torque mais utilizadas	16
Tabela 2 – Resultados obtidos na faixa de 0,14 a 300 N.m.....	22
Tabela 3 – Resultados da calibração do transdutor 5 S.H.	25

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a validação do dispositivo para calibração de Calibrador de torquímetro desenvolvido pelo Laboratório de Metrologia Mecânica (MTM) do LIT/INPE, na faixa de 0,15 a 300 N.m, para atender aos requisitos da Norma brasileira ABNT NBR ISO/IEC 17025 e obter a acreditação do serviço de calibração de Calibrador de torquímetro junto ao INMETRO. O Sistema de calibração é composto basicamente por discos de raio definido, roldanas para regulagem de altura e pesos padrão. O disco é conectado aos transdutores do Calibrador de torquímetro e através de cabos e roldanas são conectados a pesos padrão que geram a força para girar o disco proporcionalmente ao torque requerido. Ao aplicar o peso e gerar o torque lê-se o valor do torque em um dispositivo eletrônico conectado aos transdutores de torque. A validação foi realizada seguindo o procedimento de calibração de calibrador de torquímetro LIT29-LIT11-PC-004, o Laboratório MTM adotou a combinação das seguintes técnicas para determinação do desempenho: “calibração com o uso de padrões de referência”, “comparações com resultados obtidos por outros métodos” e “avaliação da incerteza dos resultados com base no conhecimento científico dos princípios teóricos do método e na experiência prática”. Realizou-se a análise dos resultados através de comparação com resultados obtidos por outros métodos e resultados teóricos, foi utilizado o Erro Normalizado como critério de decisão. Após o processo de validação foi realizada uma calibração em todos os transdutores do Calibrador de torquímetro com o dispositivo e o resultado foi satisfatório em todos os pontos. O dispositivo para calibração de Calibrador de torquímetro desenvolvido pelo Laboratório está validado. O mesmo passou recentemente por avaliação do INMETRO necessitando apenas da apresentação de certificado de calibração dos discos padrões para obter a acreditação.

1. INTRODUÇÃO

A metrologia teve início na antiguidade partindo da necessidade do homem em quantificar alimentos, animais, membros da família e armas através de números e foi avançando com o surgimento das transações comerciais, fazendo-se necessário acrescentar unidades de medição estáveis e bem definidas para realizar transações de forma justa e pacífica. Atualmente, na era da globalização os produtos devem ser projetados para funcionar além das fronteiras dos países, as partes devem se encaixar precisamente para que as funções do produto sejam cumpridas com a qualidade necessária. Essa garantia é possível graças à adoção internacional de um sistema de metrologia maduro e estável (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (2012), a metrologia é a ciência da medição e suas aplicações, engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação.

Em toda medição efetuada, existem erros de medições provindos de fatores externos, portanto um resultado de medição é composto de duas parcelas: o resultado base e a incerteza de medição. O resultado base é o valor que mais se aproxima do valor verdadeiro, é calculado a partir da média de várias indicações à qual pode ser aplicada uma correção. A incerteza decorre da ação combinada dos vários componentes de erros que agem sobre o processo de medição (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

À medida que é utilizado o sistema de medição tende a se degradar e para manter a confiabilidade dos resultados o desempenho do sistema deve ser verificado periodicamente. A especificação dos erros sistemáticos e aleatórios apresentados nas condições em que o sistema de medição é utilizado é uma condição necessária para que os resultados obtidos sejam confiáveis. Para caracterizar o desempenho metrológico de um sistema de medição é necessário a aplicação de um procedimento denominado calibração (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

O Laboratório de Metrologia Mecânica (MTM) do LIT/INPE, dividido nas áreas de Força e Torque, Massa e Dimensional, é responsável pela calibração de Torquímetros, Medidores de Torque, Dinamômetros, Balanças, Paquímetros e Micrômetros. É acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - Cgcre, na área de Força e Torque, para serviços de calibração de Torquímetros. Destinado a atender os

grupos de Calibração e Ensaio do Setor Espacial Brasileiro e também para o atendimento da sociedade brasileira.

Com o intuito de atender os grupos de calibração do Setor Espacial Brasileiro e a sociedade em geral, a equipe do Laboratório MTM desenvolveu um dispositivo para calibração de Calibrador de torquímetro. O projeto de desenvolvimento e fabricação do dispositivo foi finalizado e atualmente deve ser validado, com o objetivo de confirmar que o método é apropriado para o uso pretendido, para atender aos requisitos da norma brasileira ABNT NBR ISO/IEC 17025 e obter a acreditação junto ao INMETRO.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento do projeto para calibrar o Calibrador de torquímetro, uma revisão bibliográfica na área de metrologia e os métodos utilizados para a validação do método, bem como os resultados obtidos e a análise dos resultados.

1.1. Justificativa

O Laboratório MTM realiza calibração de torquímetro na faixa de 0,15 a 300 N.m por intermédio de um padrão de trabalho, denominado Calibrador de torquímetro, que opera na faixa de 0,15 a 340 N.m, o qual deve ser calibrado. Com isso este padrão de trabalho era encaminhado para um laboratório externo para realização da calibração, passando por processos burocráticos no setor de compras, exigindo tempo, o padrão ficava cerca de três meses fora do Laboratório, deixando de atender serviços de calibração de torquímetros.

Com a elaboração do projeto para calibrar o Calibrador de torquímetro, será possível atender a demanda das atividades dos programas espaciais brasileiro, bem como a sociedade brasileira.

1.2. Contextualização

O dispositivo foi desenvolvido e fabricado pelo INPE. As fases de desenvolvimento do projeto consistiram em: Adquirir embasamento teórico para verificar a aplicabilidade às atividades do laboratório; realizar trabalho de pesquisa e desenvolvimento de dispositivos para calibração de calibrador de torquímetro utilizando

a técnica de comparação a pesos padrões de referência; elaborar os desenhos de fabricação e os devidos cálculos da estrutura do dispositivo; acompanhar a fabricação e montagem do dispositivo; implementar o procedimento de calibração de calibrador de torquímetro e a planilha de cálculo de incertezas (CASTRO, 2016).

Através de estudos realizados definiu-se o princípio de funcionamento: aplicar pesos em cabos de aço conectados a anéis e estes por sua vez conectados ao calibrador de torquímetro, e ao girarem geram o torque requerido (CASTRO, 2016).

Para atender a faixa completa de 0,15 N.m a 340 N.m, determinou-se que seria necessário a fabricação de 03 anéis com furos para alívio de peso e canais para fixação do cabo, sendo os diâmetros de 500 mm, 300 mm e 200 mm. Essa configuração foi necessária, pois apenas um disco não atenderia a faixa completa. Para o início da faixa a quantidade de peso necessária para gerar o torque é baixa, sendo assim com os discos de 300 mm e 500 mm não seria possível, o mesmo vale para o final da faixa, onde é necessário um peso maior e os discos menores seriam sobrecarregados (CASTRO, 2016).

Após os desenhos de fabricação realizou-se a análise dos esforços atuantes nos dispositivos. Os resultados dos cálculos foram positivos, portanto deu-se início a fabricação dos dispositivos (CASTRO, 2016).

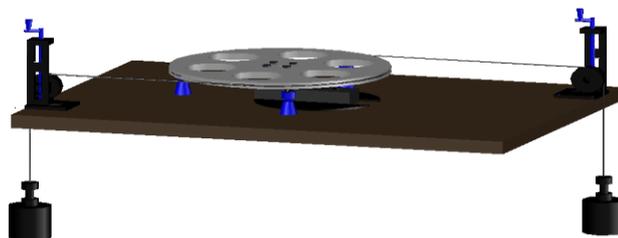


Figura 1 – Demonstração do sistema

1.3. Objetivo

Validar o dispositivo de calibração de Calibrador de torquímetro desenvolvido pelo Laboratório MTM para confirmar que os métodos adotados são apropriados para o uso pretendido.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Medição

As medições estão presentes em, praticamente, todos os ramos da atividade humana, desde as atividades mais simples do dia-a-dia como na compra de um alimento, onde o consumidor deve pagar um preço justo com base na medição feita por uma balança, até as operações mais complexas realizadas nas indústrias, como a regulação e operação de máquinas e a qualidade do produto final em uma linha de produção. A agricultura, a pecuária, o comércio, a indústria e o setor de serviços não poderiam existir na forma como hoje são conhecidos sem que medições confiáveis fossem efetuadas (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Medir é comparar uma grandeza com uma outra, de mesma natureza, tomada como padrão. Logo, medição é o conjunto de operações que tem por objetivo determinar o valor de uma grandeza. A grandeza é o atributo físico de um corpo que pode ser distinguido qualitativamente e expresso quantitativamente sob a forma de um número, por exemplo, cada um dos aspectos como comprimento, massa e volume implica numa grandeza física diferente (IPEM-SP, 2013).

Para determinar o valor numérico de uma grandeza, é necessário que se disponha de uma outra grandeza de mesma natureza, definida e adotada por convenção, para fazer a comparação com a primeira, ou seja, uma unidade de medição. Definida a unidade de medição se faz necessário determinar o padrão de referência desta unidade. O padrão reconhecido como tendo a mais alta qualidade metrológica e cujo valor é aceito sem referência a outro padrão é denominado Padrão Primário. Um padrão cujo valor é estabelecido pela comparação direta com o padrão primário é denominado de Padrão Secundário, e assim sucessivamente, criando uma cadeia de padrões onde um padrão de maior qualidade metrológica é usado como referência para o de menor qualidade metrológica (IPEM-SP, 2013).

Com os padrões de referência definido é necessário selecionar o instrumento de medir adequado, levando em consideração a grandeza que se pretende medir e o grau de exatidão que se pretende obter no resultado da medição. Posteriormente é estabelecido o método de medição, adotado em razão da grandeza a ser medida, da exatidão requerida

e de outros condicionantes que envolvem uma série de variáveis. Por fim, após medir a grandeza é declarado o resultado da medição. Toda medição apresenta erros e quando se trata de medições para fins científicos ou tecnológicos estes devem ser expressos juntamente com o resultado base, sendo assim o resultado de uma medição é composto por resultado base e a incerteza de medição. O resultado base é o valor central da faixa que corresponde o resultado de medição e a incerteza está relacionada à dúvida presente no resultado de medição (IPEM–SP, 2013).

A medição passou por uma longa trajetória de evolução até atingir o grau de confiabilidade que é exigido atualmente. Desde a antiguidade o homem sentia a necessidade de medir, fosse para definir seu espaço, o objeto que teceu ou a mercadoria que estivesse sendo transacionada (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

O desenvolvimento industrial acarretou em pressões mundiais por mais qualidade, levando os dois últimos séculos a uma acelerada evolução do nível tecnológico e da linguagem, transformando a prática de medição em uma ciência – a metrologia (CAMARGO, 2004 apud DANTAS, 2007).

2.2. Metrologia

Metrologia, palavra de origem grega (metron: medida; logo: ciência), é definida como a “ciência da medição” e suas aplicações, e tem como foco principal prover confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medidas. Como as medições estão presentes, direta ou indiretamente, em praticamente todos os processos de tomada de decisão, a abrangência da metrologia é imensa, envolvendo a indústria, o comércio, a saúde e o meio ambiente (LONGO, 2005 apud DANTAS, 2007).

A metrologia engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação (VIM, 2012). Promove a qualidade de produtos e serviços através da calibração de instrumentos e da realização de ensaios, assegurando a exatidão exigida no processo produtivo, sendo uma ferramenta indispensável na avaliação de conformidade de produtos e processos, proporcionando a cidadania (saúde, segurança e meio ambiente), sendo a base fundamental para a competitividade das empresas (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

2.2.1. O desenvolvimento da metrologia

Ao longo do período colonial, por volta do século XIX, os produtos importados traziam consigo suas próprias medidas e, quanto mais geograficamente restrita uma atividade econômica, mais específico era o sistema de medidas utilizado. Neste cenário, era de pouca utilidade a busca por coerência ou a equivalência precisa e com isso os comerciantes enfrentavam diversos problemas como diversidade dos padrões utilizados, corrupção em sua aplicação, ausência de um regimento específico para calibração de pesos e medidas, diversidade de unidades de medidas e cobrança de altas taxas para realizar a calibração (DIAS, 1998).

Desde o período colonial a metrologia já vem se tornando fundamental para a qualidade de produtos, serviços e transações comerciais e hoje na era da globalização os produtos devem ser projetados para funcionar além das fronteiras dos países. Mecanismos de precisão produzidos na Suíça devem ser integrados a um periférico de computador montado na China que comporá um sistema alemão para medição de peças produzidas por uma companhia de aviação americana. As partes devem se encaixar precisamente para que as funções do componente, do mecanismo e do produto sejam cumpridas com a qualidade necessária. Não há mais espaço para o artesão que, com paciência e habilidade manual consegue ajustar individualmente peças de forma magistral. Peças são hoje produzidas para encaixarem-se com as outras de forma prevista pelo projetista. Essa garantia é possível graças à adoção internacional de um sistema de metrologia maduro e estável (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

O desenvolvimento da metrologia foi, é, e sempre será impulsionado pela evolução tecnológica. Projetando para o futuro a linha da história do desenvolvimento tecnológico, é possível esperar grandes avanços para os próximos anos, que, fatalmente, trarão os limites da metrologia para níveis ainda mais formidáveis (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

2.2.2. Metrologia no Brasil

No Brasil as questões de metrologia estão bem definidas e oficialmente organizadas. Instituído em 1973, o Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e

Qualidade Industrial (Sinmetro) tem a missão de formular e executar a política nacional de metrologia, normalização e qualidade. É composto por dois órgãos: um normativo, o Conmetro, e outro executivo, o Inmetro (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

O Conselho de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro) é responsável por assegurar a uniformidade das unidades de medidas utilizadas no país, fixar critérios e procedimentos para certificação de qualidade de produtos industriais e também por aplicar penalidades nos casos de infração à legislação (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade (Inmetro) é vinculado ao Ministério da Indústria, do Comércio e do Turismo (MICT). Dentre as competências e atribuições ligadas a metrologia, destacam-se: prover o país de padrões metrológicos nacionais, estruturar e gerenciar o sistema de referências metrológicas brasileiras e assegurar rastreabilidade aos padrões metrológicos das redes brasileiras de laboratórios acreditados; fiscalizar e verificar os instrumentos de medir empregados na indústria, no comércio e em outras atividades relacionadas à proteção do cidadão e do meio ambiente; gerenciar os sistemas brasileiros de acreditação de laboratórios de calibração e ensaios e de organismos de certificação e de inspeção; coordenar a Rede Brasileira de Calibração (RBC), a Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios (RBLE) e a Rede Nacional de Metrologia Legal e Qualidade (RNML) (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

As componentes de metrologia do Inmetro estão agrupadas em duas grandes diretorias: Diretoria de Metrologia científica e industrial e Diretoria de Metrologia legal (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

A metrologia científica trata, fundamentalmente, dos padrões de medição internacionais e nacionais, dos instrumentos laboratoriais e das pesquisas e metodologias científicas relacionadas ao mais alto nível de qualidade metrológica. A metrologia industrial trata da aplicação da metrologia no controle dos processos produtivos e na garantia da qualidade dos produtos finais (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

A metrologia legal tem como objetivo principal proteger o consumidor tratando das unidades de medida, métodos e instrumentos de medição de acordo com as exigências técnicas e legais obrigatórias. Com a supervisão do governo, o controle

metrológico estabelece adequada transparência e confiança com base em ensaios imparciais. A exatidão dos instrumentos de medição garante a credibilidade nos campos da economia, saúde, segurança e meio ambiente (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

O Inmetro tem como missão trabalhar decisivamente para o desenvolvimento socioeconômico e para melhoria da qualidade de vida da sociedade brasileira, contribuindo para a inserção competitiva, para o avanço científico e tecnológico do país para a proteção do cidadão, especialmente nos aspectos ligados à saúde, segurança e meio ambiente (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

2.3. Calibração

Os resultados de medições são utilizados como parâmetro para questões como, estudos científicos e tecnológicos, estimativas financeiras para projetos, verificação do atendimento a limites especificados em legislações ou normas, em comparações para reconhecimento mútuo entre laboratórios, na concretização de produtos, em apoio a decisões judiciais e médicas entre outros. Para manter a universalidade e confiabilidade dos resultados obtidos, o sistema de medição deve ser submetido a uma calibração. (COUTO et al., 2002 apud DANTAS, 2007).

Sistemas de medição sempre apresentam erros, sejam eles originados internamente ao sistema de medição ou decorrentes da ação de várias grandezas de influências externas. Mesmo nas condições normais de uso, a degradação da qualidade é inevitável e progressiva. As calibrações são rotineiramente realizadas como forma de assegurar que os sistemas de medição em uso ainda apresentam condições de indicar resultados confiáveis, que levam a tomadas de decisões seguras e preservem a qualidade de processos e produtos (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

A calibração consiste num conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, uma relação entre os valores indicados por um sistema de medição e os valores de referência correspondentes estabelecidos por padrões (VIM, 2012). Os padrões são meios de medição com qualidade superior e valores de referência com excelentes níveis de incerteza. Portanto os tipos de padrões e a maneira de empregá-los determinam alguns diferentes métodos de calibração como a calibração direta, a

calibração indireta, a calibração *in loco* e a calibração parcial (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Na calibração direta de um sistema de medição, o padrão utilizado é um conjunto de medidas materializadas aplicadas diretamente sobre o sistema de medição a calibrar. O valor de referência do padrão é comparado com a indicação do sistema de medição a calibrar, as diferenças encontradas entre esses valores são atribuídos aos erros do sistema de medição calibrado. A calibração de uma balança usando massas-padrão com incerteza cerca de dez vezes menor que as incertezas esperadas para a balança calibrada é um exemplo de calibração direta. A correção e a incerteza-padrão são calculadas a partir de medições repetitivas efetuadas para o ponto calibrado. A calibração direta é limitada a calibrações estáticas (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Na impossibilidade de utilizar medidas materializadas utiliza-se o método de calibração indireta. A grandeza a medir é gerada por um dispositivo auxiliar. A medição da grandeza é feita pelo sistema de medição a calibrar e, simultaneamente, por outro sistema de medição, usado como referência, às indicações de ambos os sistemas são comparadas. As incertezas do sistema de medição-padrão são dimensionadas de forma a serem cerca de dez vezes melhores que a do sistema de medição a calibrar, de tal forma que as diferenças encontradas entre as indicações possam ser atribuídas aos erros do sistema de medição a calibrar. A calibração de um voltímetro usando um voltímetro padrão como referência, estando ambos expostos à mesma tensão é um exemplo de uma calibração indireta. Calibrações estáticas e dinâmicas podem ser realizadas pelo método indireto, desde de que as características do sistema de medição-padrão e da infraestrutura de calibração assim os permitam (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

A calibração *in loco* é uma alternativa para os casos em que as condições de uso diferem muito das condições de calibração. Nesse caso, os padrões são levados até o local onde o sistema de medição se encontra e a calibração é efetuada no local e nas condições de uso. Calibrações realizadas *in loco* não fazem parte da rotina da maioria dos laboratórios de calibração, são serviços diferenciados, mas realizado com o devido cuidado, levam a resultados perfeitamente confiáveis (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

A calibração parcial consiste em calibrar separadamente um ou mais módulos que compõe o sistema de medição. Por exemplo, durante a fase de desenvolvimento de um novo modelo de medidor de velocidade tipo *quinta* roda é conveniente avaliar o

desempenho do gerador usado para transformar o sinal de rotação em uma tensão elétrica proporcional (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

A calibração também é utilizada para caracterizar o valor efetivo de medidas materializadas, como por exemplo, o valor efetivo de uma massa-padrão ou o comprimento de um bloco-padrão, e em materiais de referência como a determinação efetiva da concentração de um reagente químico ou do seu pH. O resultado da calibração é registrado em relatórios ou certificados, que apresentam informações sobre o procedimento adotado, as condições em que a calibração foi realizada, tabelas ou gráficos com a estimativa da correção a ser aplicada e a incerteza associada à correção (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

2.4. Metrologia em torque

Na revolução industrial o homem começou a produzir máquinas e equipamentos em larga escala. Desde então, a evolução tecnológica e um mercado competitivo levou a necessidade de redução de gastos e o ganho em eficiência e exatidão. Com isto começou a surgir mecanismos e máquinas com resistência calculada para o seu funcionamento, diminuindo o desperdício de materiais e reduzindo o custo de fabricação. Logo esta tecnologia começou a ser aplicada aos elementos roscados de maneira a não danificá-los e nem rompê-los. Esta força aplicada é calculada através da grandeza torque (INMETRO, 2005 apud DANTAS, 2007).

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, R. et al., 2003 apud DANTAS, 2007).

2.4.1. Definição de torque

Torque ou momento de uma força é uma grandeza física derivada da força (F) aplicada a um corpo, a uma distância (d) perpendicular a um eixo desse corpo, de tal

modo que seja produzida uma rotação em torno desse eixo. O símbolo T é empregado para representá-lo sendo específico para momento de movimento ou torsional (INMETRO, 2005 apud DANTAS, 2007).

$$T = F \times d \quad [N.m]$$

A unidade de torque do Sistema Internacional (SI) é o newton metro (N.m). Há instrumentos de medição que fornecem valores de torque em outros sistemas, fazendo-se necessário uma tabela de conversão. Na tabela 1 é ilustrada as relações mais utilizadas (INMETRO, 2005 apud DANTAS, 2007).

Tabela 1: Relações entre as unidades de torque mais utilizadas

1 N.m	= 0,10197 kgf.m
1 N.m	= 0,73756 lbf.pé
1 lbf.m	= 1,3558 N.m
1kgf.m	= 9,80665 N.m

2.5. Validação de métodos

Demonstrar a qualidade de medições por intermédio de sua comparabilidade, rastreabilidade e confiabilidade, está sendo cada vez mais exigido. Dados não confiáveis podem levar a decisões desastrosas e a grandes prejuízos financeiros (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). Para garantir que um novo método de medição gere informações confiáveis, ele deve sofrer uma avaliação denominada validação. Um processo de validação bem definido oferece evidências objetivas de que os métodos são apropriados para o uso desejado (DICLA, 2011).

A Norma NBR ISO/IEC 17025:2005 no item 5.4.5 defini a validação como a confirmação por exame e fornecimento de evidência objetiva de que os requisitos específicos para um determinado uso pretendido são atendidos e descreve que devem ser validados métodos não normalizados, métodos criados/desenvolvidos pelo laboratório, métodos normalizados usados fora do escopo para os quais foram concebidos, ampliações e modificações de métodos normalizados. O laboratório deve registrar os resultados obtidos, o procedimento utilizado para a validação e uma declaração de que o método é ou não adequado para o uso pretendido.

A técnica para a determinação do desempenho de um método pode ser uma das seguintes ou uma combinação destas:

- Calibração com uso de padrões de referência ou materiais de referência;
- Comparações com resultados obtidos por outros métodos;
- Comparações interlaboratoriais;
- Avaliação sistemática dos fatores que influenciam o resultado;
- Avaliação da incerteza dos resultados com base no conhecimento científico dos princípios teóricos do método e na experiência prática;

A comparação dos resultados obtidos na validação com os resultados obtidos por outros métodos pode ser realizada utilizando diversos critérios de decisão, entre os quais: Erro relativo (ER); Índice z (z-score); Erro normalizado. Quando o valor obtido não estiver dentro do intervalo da região de aceitação para o valor certificado, o laboratório deve procurar as causas desse desvio e procurar eliminá-las (DICLA, 2011).

2.5.1. Critérios de decisão

2.5.1.1. Erro relativo (ER)

Uma forma de avaliar a exatidão do método é por meio do cálculo do erro relativo, expresso em porcentagem por meio da expressão (DICLA, 2011).

$$ER = \frac{X_{lab} - X_v}{X_v} \times 100$$

X_{lab} = valor obtido experimentalmente ou média aritmética de valores obtidos
 X_v = valor obtido pelo método a ser comparado

2.5.1.2. Índice z (z-score)

O índice z é também um modo de avaliar o desempenho do laboratório em comparações interlaboratoriais (DICLA, 2011).

$$z = \frac{(X_{lab} - X_v)}{s}$$

X_{lab} = valor obtido pelo laboratório;
 X_v = valor obtido pelo método a ser comparado;
s = desvio-padrão do ensaio de proficiência.
A avaliação é feita com o seguinte critério de decisão:
 $|z| \leq 2$ - Resultado satisfatório;
 $2 < |z| < 3$ - Resultado questionável;
 $|z| \geq 3$ - Resultado insatisfatório.

2.5.1.3. Erro normalizado (EN)

O valor obtido pelo método a ser comparado (X_v) deve estar dentro do intervalo ($X_{lab} \pm U_{lab}$), onde U_{lab} é o resultado da incerteza expandida calculada pelo laboratório. Quando isso não ocorre, esse intervalo pode estar subestimado, então é empregado o conceito de erro normalizado (E_n) (DICLA, 2011):

$$E_n = \frac{(X_{lab} - X_v)}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}$$

Sendo:

X_{lab} = média dos valores indicados do objeto

X_v = média dos valores indicados pelo laboratório acreditado

U_{ref} = incerteza associada ao método a ser comparado

Se $E_n \leq 1$ satisfatório, o resultado do laboratório é adequado.

3. METODOLOGIA

Realizou-se um estudo sobre o projeto desenvolvido para calibração de Calibrador de torquímetro, dos métodos existentes no mercado, das normas que regem o laboratório, de livros na área de metrologia e cálculos de incerteza e posteriormente iniciou-se validação do método.

O dispositivo para calibração de Calibrador de torquímetro é fixo sobre uma mesa, é conectado ao Calibrador de torquímetro e através de um adaptador o disco de raio definido é interligado ao transdutor de torque, os cabos são fixados na lateral do disco e roldanas, os pesos padrões são dispostos verticalmente e em equilíbrio na extremidade do cabo, gerando a força para girar o disco proporcionalmente ao torque requerido. O Calibrador de torquímetro a ser calibrado é conectado a um dispositivo eletrônico, padrão de trabalho, onde é realizada a leitura do torque aplicado. Para a faixa de alto torque, é utilizado um carrinho hidráulico para o levantamento dos pesos.

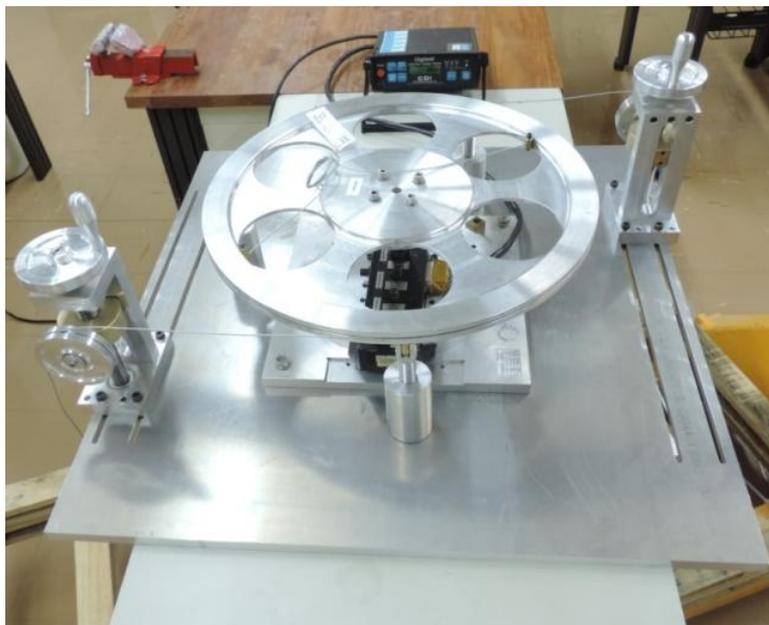


Figura 2 - Demonstração completa do sistema

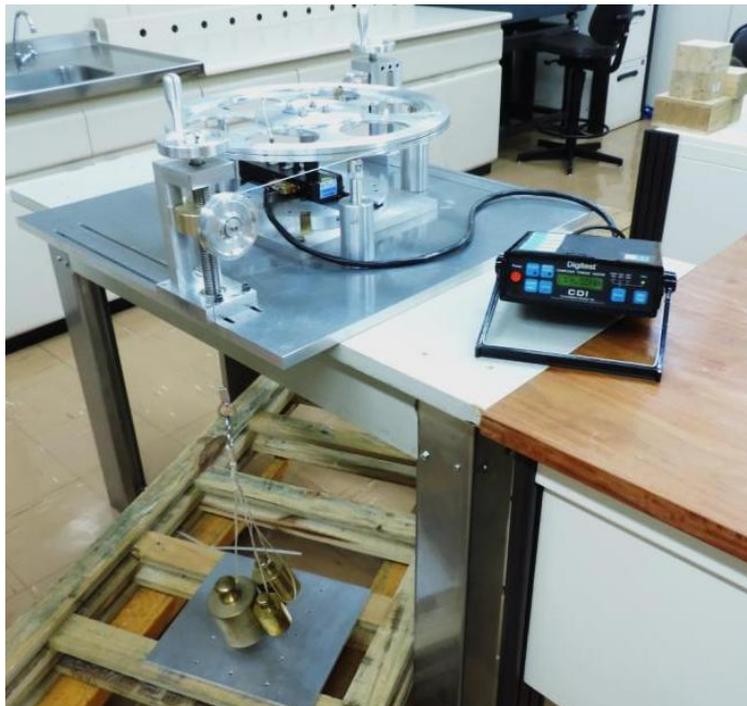


Figura 3 – Sistema funcionando

3.1. Desenvolvimento

O dispositivo para calibração de Calibrador de torquímetro foi validado realizando uma calibração em todos os transdutores do Calibrador de torquímetro utilizado no Laboratório MTM como padrão de trabalho. A calibração foi efetuada no sentido horário, anti-horário e a 90 graus, nos pontos selecionados do início, meio e fim da faixa de cada transdutor, na faixa de 0,14 a 300 N.m, seguindo o procedimento de calibração de Calibrador de torquímetro - LIT29-LIT11-PC-004 - que se baseia nas normas ABNT NBR ISO 6789 e 12240.

Apesar de o dispositivo operar na faixa de 0,14 a 340 N.m determinou-se que o mesmo seria validado na faixa de 0,14 a 300 N.m, levando em conta que o Laboratório é acreditado para realizar calibração de torquímetros nesta faixa.

O Laboratório MTM adotou a combinação das seguintes técnicas para a determinação do método: “calibração com o uso de padrões de referência”, “comparações com resultados obtidos por outros métodos” e “avaliação da incerteza dos resultados com base no conhecimento científico dos princípios teóricos do método e na experiência prática”.

Os resultados obtidos na calibração foram comparados a resultados de um laboratório acreditado pelo INMETRO, que utiliza um método diferente do desenvolvido pelo Laboratório MTM e com resultados baseados em conhecimento científico dos princípios teóricos do método. Utilizou-se o Erro Normalizado (EN) como critério de decisão.

$$E_n = \frac{(X_{lab} - X_v)}{\sqrt{U^2_{lab} + U^2_{ref}}}$$

X_{lab} = média dos valores indicados do objeto

X_v = média dos valores indicados pelo laboratório acreditado

U_{ref} = incerteza associada ao método a ser comparado

Se $E_n \leq 1$ satisfatório, o resultado do laboratório é adequado.

Observação: quando o resultado é comparado com base no conhecimento científico dos princípios teóricos do método é adotado $U_{ref} = 0$ e X_v = valor verdadeiro do mensurando.

Ao aplicar o peso corretamente distribuído, o valor de torque apresentado é digitado na Planilha para Análise e Cálculos de Incertezas de Calibradores de torquímetro - LIT29-LIT11-PE-006 - e através do erro normalizado (EN) o resultado é comparado ao resultado do laboratório acreditado pelo INMETRO e posteriormente com o resultado dos cálculos teóricos.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados obtidos na validação do método

Os resultados obtidos na validação do sistema são apresentados na tabela 2. Os pontos do início, meio e fim da faixa foram selecionados de acordo com os pontos determinados e descritos no certificado do laboratório acreditado e estão representados como ponto 1, 2 e 3.

Tabela 2: Resultados obtidos na faixa de 0,14 a 300 N.m.

Validação do método para calibração de Calibrador de torquímetro					
Transdutor	Pontos (Início, meio e fim da faixa e 90°)	Resultado do erro normalizado Satisfatório ≤ 1			
		SENTIDO HORÁRIO		SENTIDO ANTI-HORÁRIO	
		Laboratório acreditado	Cálculos teóricos	Laboratório acreditado	Cálculos teóricos
1 0,14 a 1,19 (N.m)	Ponto 1	0,22	0,26	0,61	0,65
	Ponto 2	0,04	0,33	0,66	0,05
	Ponto 3	0,43	0,38	1,00	0,07
	Girando a 90°	0,19	0,44	0,53	0,15
2 1,19 a 5,7 (N.m)	Ponto 1	0,01	0,30	0,03	0,01
	Ponto 2	0,57	0,01	0,21	0,01
	Ponto 3	0,51	0,96	0,40	0,96
	Girando a 90°	0,72	0,24	0,70	0,89
3 5,7 a 28,3 (N.m)	Ponto 1	0,73	0,31	0,34	2,29
	Ponto 2	1,56	0,30	1,47	0,30
	Ponto 3	1,64	0,44	4,86	0,00
	Girando a 90°	1,56	0,30	1,31	0,00
4 28,3 a 113 (N.m)	Ponto 1	0,36	4,34	4,44	0,99
	Ponto 2	0,84	0,25	1,09	0,08
	Ponto 3	3,1	0,0	1,70	0,84
	Girando a 90°	1,0	0,39	--	--
5 113 a 300 (N.m)	Ponto 1	--	0,8	2,07	0,73
	Ponto 2	1,71	0,66	--	--
	Ponto 3	--	--	--	3,41

Em alguns pontos os resultados foram insatisfatórios, Erro normalizado (EN) >1. Após uma análise dos resultados e testes efetuados durante a validação, aplicou-se algumas melhorias, conforme detalhado posteriormente. Vale ressaltar que grande parte dos resultados obtidos foram satisfatórios.

O dispositivo eletrônico, padrão de trabalho, onde é realizada a leitura do torque aplicado deve ser zerado antes de aplicar os pesos, para desprezar possíveis influências no resultado apresentado.

Inicialmente era utilizado cabo de cobre na faixa de alto torque para conectar o disco ao peso padrão, para melhoria na flexibilidade e diminuição do atrito entre o cabo e o disco, o cabo de cobre foi substituído por cabo de aço.

Foi constatado que quando o sistema não está nivelado o resultado se torna insatisfatório, logo se deu início ao desenvolvimento de um dispositivo para nivelamento, apresentado na figura 4.

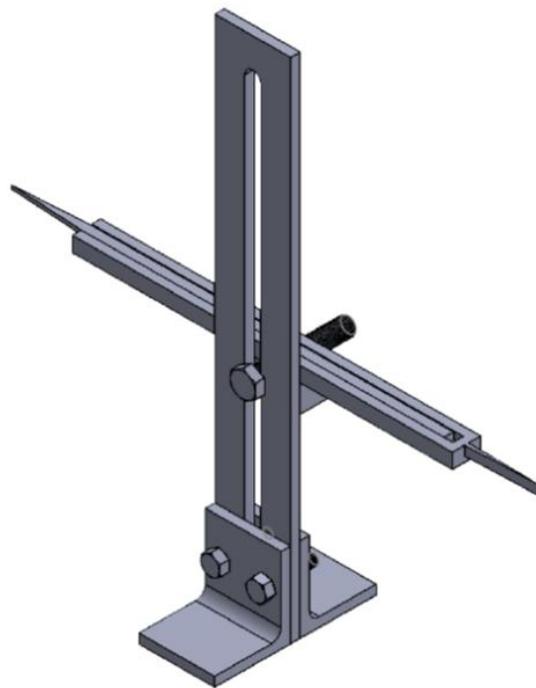


Figura 4 – Sistema de nivelamento

Identificou-se uma folga ao conectar o disco com os transdutores 02 e 03, influenciando no resultado. Foi desenvolvido um conector adequado para eliminar a folga.

Durante a validação foi detectado que é necessário vencer o atrito existente entre o disco e o cabo de aço, aplicando uma pequena força no cabo com os pesos devidamente posicionados, com este método o resultado foi aprimorado. Esta técnica foi acrescentada ao procedimento LIT29-LIT11-PC-004.

Para faixa de alto torque, implantou-se um sistema para levantamento de peso que consiste em um carrinho hidráulico, ilustrado na figura 5.



Figura 5 – Sistema com o carrinho hidráulico

Foram realizadas algumas alterações na Planilha para Análise e Cálculos de Incertezas de Calibradores de torquímetro - LIT29-LIT11-PE-006 - acrescentando a fonte de incerteza resultante do cabo e do raio do disco.

Após as alterações e melhorias efetuou-se uma nova calibração em todos os transdutores do Calibrador de torquímetro por intermédio do dispositivo para calibrar o Calibrador de torquímetro, o resultado foi satisfatório em todos os transdutores. O resultado da calibração no transdutor 5 no sentido horário (S.H.) é apresentado na tabela 3 e graficamente na figura 7.

Torque de Referência	Torque Indicado	Erro Relativo de Indicação	Erro Relativo de Repetitividade	Erro Relativo de Reprodutibilidade	Incerteza Expandida da Calibração	k
T_r N.m	T_i N.m	$E1$ %	$E2$ %	$E3$ %	U %	
34,28	34,31	0,1	0,0	0,1	1,2	2,0
68,55	68,57	0,0	0,0	0,1	0,58	2,0
102,82	102,9	0,1	0,1	0,2	0,51	2,0
137,10	137,2	0,1	0,1	0,1	0,50	2,0
171,38	171,4	0,0	0,1	0,1	0,50	2,0
205,6	205,7	0,0	0,0	0,1	0,50	2,0
269,3	269,3	0,0	0,0	0,0	0,50	2,0
303,6	303,0	-0,2	0,0	0,0	0,49	2,0

Tabela 3 – Resultados da calibração do transdutor 5 sentido horário

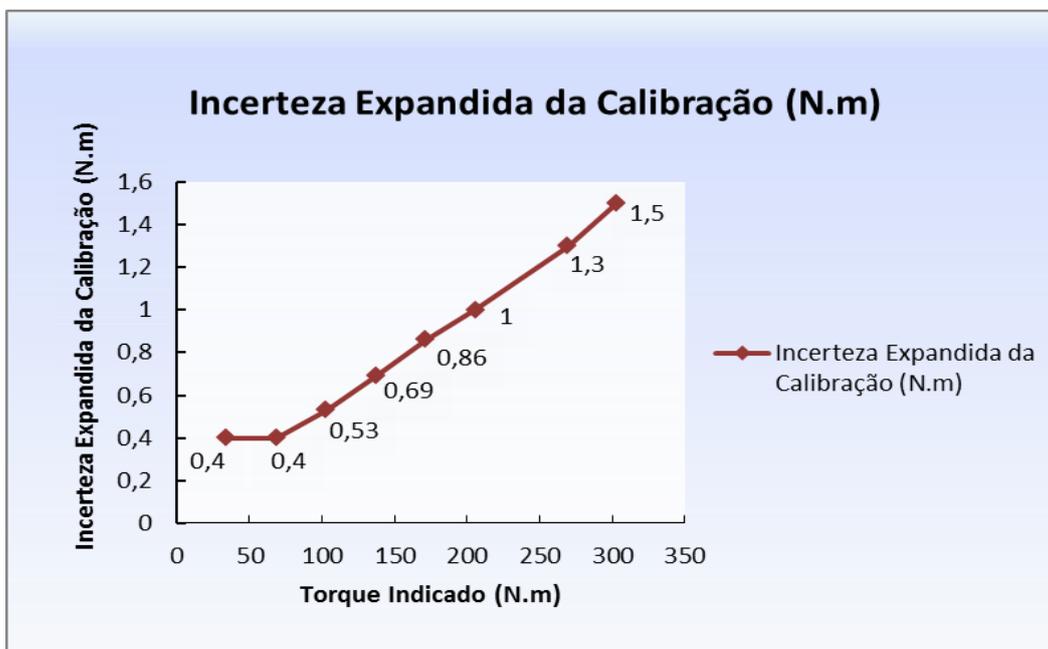


Figura 6 – Gráfico: Incerteza expandida da calibração no transdutor 5 S.H.

5. CONCLUSÃO

Finalizadas todas as etapas de elaboração, construção e validação do método o dispositivo para calibração de Calibrador de torquímetro está apto para atender a demanda das atividades dos programas espaciais brasileiro, bem como a sociedade brasileira.

Todos os objetivos propostos no início do trabalho foram atingidos, o dispositivo está validado, os resultados da validação foram satisfatórios, demonstrando portanto que está apropriado para o uso pretendido. O Laboratório de Metrologia Mecânica passou recentemente por avaliação do INMETRO e o dispositivo foi aprovado, fazendo-se necessário apenas a apresentação do certificado de calibração dos discos padrões para obter a acreditação.

As sugestões de melhorias no dispositivo resultam no desenvolvimento de um sistema automatizado para levantamento de pesos na faixa de alto torque.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, Armando; SOUZA, André Roberto. **Fundamentos de Metrologia científica e industrial**. Barueri-SP: Manole Ltda, 2008.

CASTRO, Marcelo V. B. **Projeto e Desenvolvimento de Dispositivo para Calibração de Calibrador de Torquímetros Utilizados na Integração de Satélites**. 2016. 17 f. Relatório final de Projeto de Iniciação Científica, PIBIC/CNPq/INPE, São José dos Campos-SP, 2016.

IPEM-SP. Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo. **Conceitos básicos sobre medição**. 2013. Disponível em: < <http://www.ipem.sp.gov.br> >. Acesso em: 25 jun. 2017.

DANTAS, Alexandre Barretos. **Desenvolvimento e Avaliação de Padrão de Torque para Calibração de Torquímetros em Três Faixas de Medição**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

DIAS, José Luciano de Mattos. **Medida Normalização e Qualidade: Aspectos da história da metrologia no Brasil**. Rio de Janeiro: Inmetro, 1998.

DICLA, Divisão de Acreditação de Laboratórios. **ORIENTAÇÃO SOBRE VALIDAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS: Documento de caráter orientativo DOQ-CGCRE-008**. 4. ed. [s.l.]: Coordenação Geral de Acreditação (Cgcre), 2011.