

# PROJETO DE UM SENSOR DE TORQUE SEM FIO PARA EIXOS GIRANTES

ÍCARO DE VASCONCELOS BRITO, EDUARDO OLIVEIRA FREIRE

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe*  
Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 49100-000  
E-mails: icarovb@hotmail.com, eofreire@gmail.com

MICHAEL HOU

*ZEC Wind Power*  
1800 Woodward Drive, Ottawa – ON, K2C 0P7, Canadá  
E-mail: michaelhou2007@gmail.com

**Abstract**— This article describes the implementation of a low-cost wireless torque sensor for applications on rotating machines. The instrument is able to measure torque on rotating shafts and to wirelessly send the related signal to an Android device, which functions as data acquisition system. The design concept is based on voltage measurements using strain gauges. The project includes a complete bridge 350  $\Omega$  strain gauges, an Arduino UNO kit, an Arduino SD adapter, a Bluetooth module, and a 24-bit analog-to-digital converter (ADC). The implementation consists of installing the strain gauges, programming the Arduino and devising the ADC circuit. After these steps, the sensor is tested on a beam prototype. The results show that the system can perform torque measurements with a 0.0138 N·m resolution, displaying the torque curve on a smartphone/tablet screen in real time. Thus, the presented torque sensor represents a versatile, accurate and low-cost instrument to aid in the performance assessment and projects of rotating machines.

**Keywords**— Arduino, rotating shafts, instrumentation, rotating machines, strain gauge, sensor, torque.

**Resumo**— Este artigo descreve a implementação de um sensor de torque sem fio de baixo custo para aplicações em eixos girantes. O instrumento é capaz de medir o torque em máquinas rotativas, enviando, sem fio, o sinal relacionado à grandeza para um dispositivo Android, que funciona como sistema de aquisição de dados. O conceito do projeto é baseado em medições de tensão utilizando extensômetros resistivos (*strain gauges*). O projeto inclui um conjunto de *strain gauges* 350 $\Omega$  em ponte completa, um kit Arduino UNO, um adaptador SD para Arduino, um módulo Bluetooth e um conversor analógico-digital (ADC) de 24 *bits*. A implementação consiste em instalar os *strain gauges*, programar o Arduino e fabricar o circuito ADC. Após essas etapas, o sensor é testado em um protótipo de eixo. Os resultados mostram que o sistema pode realizar medições de torque com uma resolução de 0,0138 N·m, exibindo, em tempo real, a curva de torque em uma tela de *smartphone/tablet*. Assim, o sensor de torque apresentado representa um instrumento versátil, preciso e de baixo custo para auxiliar na avaliação de desempenho e em projetos de máquinas girantes.

**Palavras-chave**— Arduino, eixos girantes, instrumentação, máquinas rotativas, *strain gauge*, sensor, torque.

## 1 Introdução

Torque é um parâmetro importante a ser medido em processos que envolvem transferência de energia por meio de dispositivos mecânicos, como o que ocorre em um eixo de turbina eólica ou de motor à combustão. Como o torque está relacionado à potência mecânica disponível em todos os pontos de um sistema rotacional, medi-lo significa seguir o fluxo de energia, que é uma grandeza chave nas linhas de pesquisa e desenvolvimento de máquinas rotativas (Schicker e Wegener, 2002). Com informações sobre o torque, as perdas podem ser determinadas e o dimensionamento pode ser calculado com precisão (Kang e Meneveau, 2010). Além disso, estudos mostram que medições de torque auxiliam na detecção de acoplamentos desalinhados (Reddy e Sekhar, 2015) e na predição de defeitos no maquinário (Dzapo *et al.*, 2004).

Diferentes técnicas de medição de torque são abordadas na literatura. Na obra de Schicker e Wegener (2002), há uma descrição de métodos clássicos, como cálculo pela potência elétrica, medição de des-

vio angular e emprego de extensômetros (*strain gauges*). Baghli, Pautex e Mezani (2010) propõem a utilização de acelerômetros em aplicações nas quais é importante avaliar as variações instantâneas do conjugado. Flieh, Totoki e Lorenz (2017), por outro lado, avaliam o torque a partir de um modelo matemático de dinamômetro, argumentando que uma modelagem adequada do sistema é capaz de fornecer informações precisas do torque tanto nos momentos de velocidade estável quanto nos transientes.

Neste trabalho, optou-se pela medição tradicional de torque por meio de *strain gauges* resistivos, especialmente devido a sua simplicidade e flexibilidade, podendo ser instalados em máquinas rotativas com diferentes formas construtivas e aplicações. Além da versatilidade, os *strain gauges* são inerentemente estáveis, precisos (Dzapo *et al.*, 2004) e apresentam bom desempenho quanto à linearidade e histerese (Schicker e Wegener, 2002).

O objetivo de medir o torque em eixos rotativos com *strain gauges* implica desenvolver um circuito de condicionamento de sinal. Para tal, é utilizado um conversor AD de 24 *bits* com filtro integrado. Além disso, o armazenamento e a transmissão sem fio dos dados para um dispositivo Android requer um siste-

ma embarcado de processamento e comunicação. Os dados obtidos na saída do conversor AD são processados por uma placa Arduino UNO. Os resultados são, então, armazenados em um cartão SD e transmitidos via Bluetooth para um dispositivo móvel. O sistema é alimentado por uma bateria de lítio de 2200 mAh, 7,2 V, fixa ao eixo junto com os componentes eletrônicos. O diagrama desse sistema de instrumentação é mostrado na Figura 1.

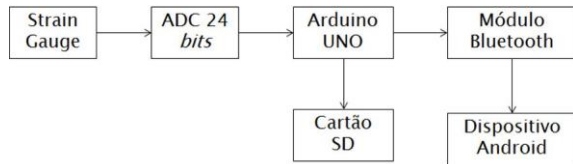


Figura 1. Diagrama de blocos do sensor de torque.

Este trabalho é organizado da seguinte forma: na Seção 2, os materiais e método empregados no projeto do sistema são descritos. A avaliação das incertezas é detalhada na Seção 3, e os resultados obtidos a partir de testes em um protótipo podem ser conferidos na Seção 4.

## 2 Materiais e método

Nesta seção, são descritos os dispositivos utilizados neste projeto e o método empregado para adquirir os dados de torque.

### 2.1 Strain Gauges

Os *strain gauges* resistivos são condutores cuja resistência varia com a deformação do objeto sobre o qual estão fixados. O princípio é baseado na primeira Lei de Ohm, isto é, no fato de a resistência ser proporcional ao comprimento do condutor. Nesse ponto, é importante definir duas grandezas para o estudo da deformação em materiais: a taxa de deformação  $\varepsilon$  e o fator gauge  $K$ .

A taxa  $\varepsilon$  é uma grandeza adimensional que indica a deformação sofrida por um corpo devido à ação de forças externas (Omega Instruments, 1999). Matematicamente,  $\varepsilon$  é definida como a variação relativa de comprimento. Isso significa que  $\varepsilon$  é adimensional e dada por

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (1)$$

em que  $\Delta L$  e  $L$  são o enlogamento e o tamanho original do eixo, respectivamente, como ilustrado na Figura 2.

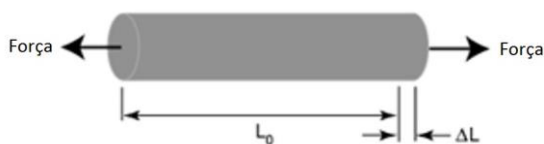


Figura 2. Deformação mecânica que ocorre quando uma força uniaxial é aplicada.

Para a maioria dos metais, os valores práticos de  $\varepsilon$  são da ordem de  $10^{-6}$ , sendo frequentemente expressos em *microstrains* (equivalente a partes por milhão ou ppm), com o símbolo  $\mu\varepsilon$  (Wire, 2008).

As tensões como mostradas na Figura 2 são chamadas de tensões normais. No entanto, para medições de torque em máquinas rotativas, é necessário estender o conceito de tensão para incluir o efeito de cisalhamento. Essa tensão é uma medida de distorção angular que acontece quando o torque tende a torcer um objeto em torno de seu eixo longitudinal (Royle, 2000), como na Figura 3.

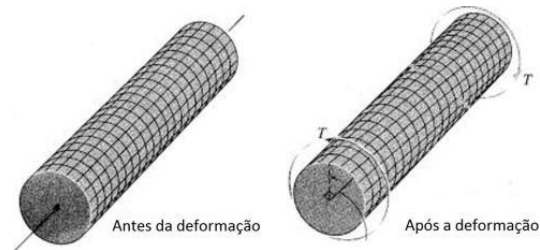


Figura 3. Representação da tensão de cisalhamento.

O fator gauge  $K$ , por sua vez, indica o grau de sensibilidade do sensor. A grandeza  $K$  também é uma quantidade adimensional e relaciona a variação relativa da resistência ( $\Delta R/R$ ) do *strain gauge* com  $\varepsilon$  (Wire, 2008), isto é,

$$K = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Para os *strain gauges* metálicos utilizados neste projeto,  $K$  é nominalmente igual a dois (Wire, 2008). Esse valor indica que as resistências irão variar na mesma ordem de grandeza de  $\varepsilon$ .

Uma vez que as deformações medidas são em geral menores que  $100 \mu\text{m/m}$ , o desafio na técnica proposta é, então, medir as pequenas variações de resistência. Os *strain gauges* comerciais apresentam valores de resistência nominal entre 30 e  $3000 \Omega$ , sendo 350 e  $1000 \Omega$  os mais comuns (National Instruments, 2014). Os transdutores utilizados neste projeto são de  $350 \Omega$ ; isso significa que uma deformação de  $100 \mu\text{m/m}$  altera a resistência em  $0,07 \Omega$ . Assim, em vez de medir a variação da resistência diretamente, a literatura sugere o uso dos *strain gauges* em uma configuração de ponte de *Wheatstone* (Wire, 2008), coletando-se a tensão desbalanceada da mesma, como na Figura 4.

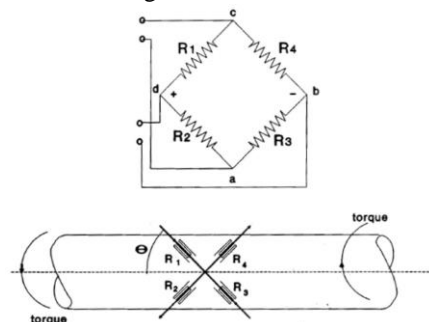


Figura 4. Circuito equivalente em Ponte de Wheatstone e esquema da instalação de *strain gauges* em um eixo girante.

Os *strain gauges* devem ser instalados a 45° em relação ao eixo horizontal, pois esse é o ângulo no qual ocorre a maior tensão causada pelo torque em eixos rotativos (Wire, 2008). O circuito em ponte de *Wheatstone* é alimentado com uma tensão  $V_{ca}$ , e a diferença de tensão entre  $d$  e  $b$  ( $V_{db}$ ) indica a intensidade da deformação. Nesse caso, o sinal de saída da ponte  $V_{db}$  relaciona-se com  $\epsilon$ , com o fator *gauge*  $K$  e com a tensão de excitação da ponte  $V_{ca}$  pela seguinte equação:

$$\frac{V_{db}}{V_{ca}} = K\epsilon \quad (3)$$

Como o projeto prevê uma eletrônica embarcada, isto é, todo o sistema de aquisição e transmissão de dados deve estar fixo no eixo junto aos *strain gauges*, optou-se por alimentar o circuito com 5  $V_{CC}$  da própria placa Arduino (plataforma do sistema). Assim, pela Equação 3, as deformações da ordem de *microstrains* resultam em leituras de  $V_{db}$  em microvolts, de modo que o sinal deve ser condicionado para posterior manipulação e interpretação.

## 2.2 Conversor analógico-digital de 24 bits

O condicionamento de sinal é um procedimento comum em projetos de sensoriamento para que a aquisição de dados proceda de forma eficaz e exata. A princípio, *strain gauges* necessitam, além da excitação  $V_{ca}$  do transdutor, amplificação do sinal  $V_{db}$ , eliminação de ruído e linearização (National Instruments, 2014).

Amplificadores de instrumentação são componentes típicos em aplicações com *strain gauges* devido às pequenas tensões geradas (Brito, 1994). Em uma abordagem tradicional, o sinal  $V_{db}$  é amplificado e enviado para uma das entradas analógicas do microcontrolador, no qual há a conversão AD. O problema surge pelo fato de o conversor do Arduino ser de 10 *bits*, o que significa uma resolução de 5mV (considerando-se os 5V de referência do Arduino). Esse fato leva à escolha de um ganho alto (maior que 100), pois as variações em newton-metro do torque geram leituras de poucas dezenas de microvolts (Brito, 1994). Assim, mesmo utilizando um amplificador de instrumentação, o ruído gerado pelo alto ganho não compensa a melhora na resolução. Desse modo, foi adicionado um conversor AD externo capaz de enviar um sinal digital com alta resolução e baixo ruído à placa Arduino, sem a necessidade de amplificação.

O conversor analógico-digital empregado neste projeto é o LTC®2440, da *Linear Technology* (Linear Technology Corporation, 2007). Esse componente apresenta uma resolução de 24 *bits* e uma arquitetura delta-sigma que permite a seleção de diferentes combinações de velocidade e resolução, podendo variar de 6,9 Hz/200 nV<sub>RMS</sub> a 3,5 kHz/25 µV<sub>RMS</sub>. A alta resolução do LTC elimina a necessidade de qualquer amplificador de instrumentação, mesmo para as pequenas tensões dos *strain gauges*. Além disso, tal

conversor possui um filtro digital interno, não sendo necessário um circuito extra para a filtragem de ruído (Thoren, 2005). O fabricante recomenda a adição de dois capacitores de *by-pass* em paralelo com a alimentação do CI. O diagrama do circuito ADC ligado à ponte de *strain gauges* pode ser visto na Figura 5.

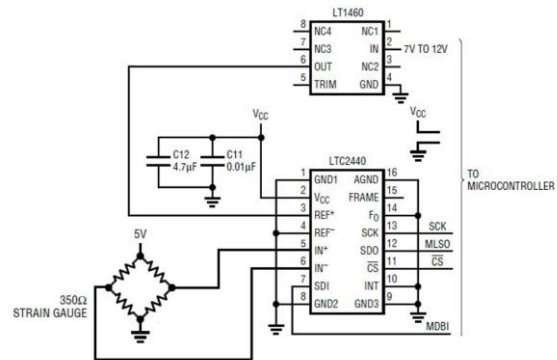


Figura 5. Diagrama do circuito conversor AD 24-bits.

Na Figura 5, os pinos 1, 8, 9 e 16 são aterrados para melhorar o fluxo de corrente para o terra. O pino 2 é a tensão de alimentação positiva (5 V do Arduino), e deve estar conectado a um capacitor de 4,7 µF em paralelo com um capacitor cerâmico de 0,01 µF. Os pinos 3 e 4 são a entrada de referência diferencial, que é escolhida como 2,5 V a fim de se reduzir o erro devido à não-linearidade, isto é, a diferença entre o valor convertido real e o ideal (Thoren, 2005). Essa tensão ( $V_{REF}$ ) é obtida pelo componente LT®1460, que fornece uma tensão de referência fixa de 2,5 V com, no máximo, 0,075% de incerteza (Linear Technology Corporation, 2010).

Os pinos 5 e 6 são a entrada analógica diferencial, isto é,  $V_{db}$ . A tensão ( $V_{IN} = IN^+ - IN^-$ ) nesses pinos pode variar de  $-0,5(V_{REF})$  a  $0,5(V_{REF})$ . O pino 7 (SDI) é a entrada serial de dados, que é usada para selecionar a velocidade/resolução do conversor. No presente projeto, o SDI foi conectado a uma saída digital do Arduino para que fosse possível o controle da taxa de conversão. Para aplicações como medição de torque, recomendam-se frequências de amostragem em torno de 1000 amostras/s (Niskanen e Ahola, 2011). Para manter um baixo nível de ruído (abaixo de 1ppm de  $V_{ref}$ ), uma taxa de 880 amostras/s foi empregada neste projeto.

A interface entre o ADC e o microcontrolador utiliza o protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), que é uma interface de comunicação serial síncrona baseada no modo mestre/escravo. Nela, o *chip select* (CS - pino 11) controla a ativação do dispositivo “escravo”. Um estado “0” lógico nesse pino habilita a saída digital (SDO - pino 12) e ativa o ADC. Nesse momento, o pino 12 envia uma cadeia de 32 *bits* de comprimento. Os primeiros 3 *bits* representam informações de status, indicando o estado de sinal e conversão. Os próximos 24 *bits* são o resultado da conversão, com o *bit* 28 sendo o MSB. Os 5 *bits* restantes são sub LSBs além dos 24 *bits* que foram incluídos no cálculo de média. Os dados são atualiza-

dos na borda decrescente do *clock* (pino SCK), como mostrado na Figura 6. O estado de saída de dados é concluído após os 32 *bits* serem lidos do ADC ou quando o CS é ajustado para “1” lógico.

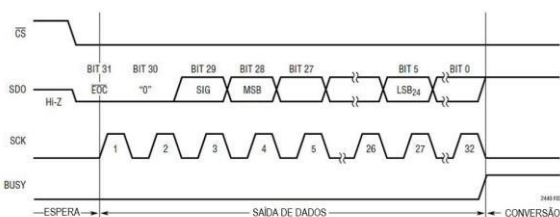


Figura 6. Saída de dados do conversor AD 24-bits.

### 2.3 Arduino UNO

Depois de se obter a saída digital do conversor AD, os dados podem ser manipulados e transmitidos por um sistema digital. A manipulação é necessária para converter a cadeia de *bits* em informações legíveis; ou seja, o valor binário deve ser manipulado para se tornar significativo para o usuário. Além disso, no caso do presente trabalho, os dados devem ser transmitidos para diferentes periféricos que são capazes de armazenar (em um cartão SD) e retransmitir (via *Bluetooth*) informações. Para executar tais tarefas, é utilizado o kit de desenvolvimento Arduino UNO, cujas partes são detalhadas na Figura 7.

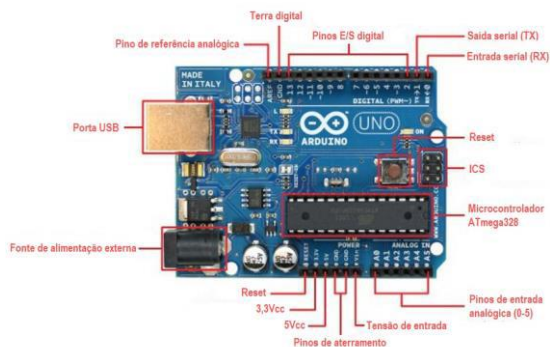


Figura 7. Plataforma de desenvolvimento Arduino UNO.

Arduino é uma plataforma completa baseada em *hardware* e *software* versáteis, com uma diversificada comunidade de usuários espalhados pelo mundo e uma extensa documentação *online* (Arduino.cc, 2018). Com um tamanho reduzido, ele possui um microcontrolador AVR de 8 *bits* (ATmega328) com capacidade de até 20 MIPS a 20 MHz (para a versão UNO usada neste projeto) e pode ser facilmente programado na linguagem *wiring*, que é essencialmente C/C++. Outro aspecto positivo do uso da placa Arduino é a sua compatibilidade com dispositivos periféricos conhecidos como *shields*. Para este projeto, por exemplo, foi utilizado um *shield* para cartão SD, descrito na subseção a seguir.

### 2.4 SD Shield

Para armazenar os dados adquiridos, foi adicionado ao sensor de torque um cartão SD. O armaze-

namento de dados é importante por ser uma forma de *back-up* e por gerar um histórico amplo de medições para posterior análise. Assim, um *shield* SD foi anexado à placa Arduino, como mostrado na Figura 8.



Figura 8. *Shield* SD compatível com Arduino UNO.

A única restrição do periférico é que o cartão SD deve ser formatado no sistema FAT16, mas isso é suficiente para armazenar até 1 GB de dados (Itead, 2015). Esse *shield* também possui uma porta UART, que permite uma conexão facilitada entre o módulo *Bluetooth* e a placa Arduino.

### 2.5 Módulo Bluetooth

Montar um sistema de medição de torque em eixos girantes com fios é uma tarefa complexa, demorada e, às vezes, impossível de ser executada (Niskanen e Ahola, 2011). Para contornar tais problemas, diversos trabalhos com sistemas *wireless* foram propostos, como em (Dzapo *et al.*, 2004), (Baghli *et al.*, 2010), e (Särkimäki *et al.*, 2006). Uma escolha comum nesse tipo de aplicação são tecnologias de rádio derivadas do padrão IEEE 802.15.4, como *Zigbee* (Howitt e Jore A., 2011). No entanto, um dos requisitos deste projeto é a comunicação com dispositivos Android, que tradicionalmente incorporaram a tecnologia *Bluetooth* (BT). Esta é definida como um *link* de comunicação sem fio, operando na banda de licença livre a 2,4 GHz (IEEE 802.15.1, 2005). Apesar de ser considerado de curto alcance (em geral, inferior a 100 m), o BT destaca-se pela simplicidade e compatibilidade com uma variedade de sistemas operacionais (Baghli *et al.*, 2010). Assim, foi adicionado ao sistema um módulo BT, modelo *BlueSMiRF* RN-42, produzido pela *SparkFun* (Roving Networks, 2011), como pode ser visto na Figura 9.



Figura 9. Módulo *Bluetooth* usado para transmitir dados de torque da placa Arduino para um smartphone Android dentro de um alcance de até 36 m.

Esse módulo utiliza comunicação serial com taxa de transmissão de até 115,2 *kbits/s*. O módulo pode ser conectado às portas RX/TX do Arduino e alimentado com uma tensão de 3,3 a 6 V. No entanto, o *shield* do cartão SD possui uma porta UART, cujos pinos são RX/TX, 5 V e GND; assim, o *Blu-*

eSMiRF foi conectado indiretamente ao Arduino pelo *shield* SD.

### 3 Avaliação das incertezas

As incertezas nas medições do sensor de torque proposto são devidas, principalmente, aos parâmetros do eixo rotativo, ao circuito dos *strain gauges* e ao conversor AD.

O torque  $T$  pode ser relacionado com a ponte de *strain gauges* e com os parâmetros do eixo por

$$T = \frac{\pi \times V_{db} \times E \times d^3}{16 \times K \times V_{ac} \times (1 + \mu)}. \quad (4)$$

A Equação 4 pode ser encontrada em (Niskanen e Ahola, 2011) e seus parâmetros com as respectivas incertezas-padrão são resumidos na Tabela 1. Para fins de avaliação numérica, foi considerada uma tensão  $V_{db}$  de 100  $\mu\text{V}$ , ou seja,  $T$  igual a 4,950 N·m.

Tabela 1. Parâmetros para a equação do torque (Dzapo *et al.* 2004)

Parâmetro	Descrição	Valor <sup>1</sup>	Incerteza $u$
T	Torque	4,950 N.m	$u(T)$
$V_{db}$	Tensão de saída do <i>strain gauge</i>	100 $\mu\text{V}$	0,1 $\mu\text{V}$
E	Elasticidade longitudinal do aço	186,8 GPa	2,8 GPa
d	Diâmetro do eixo	25,4 mm	0,1 mm
K	Fator gauge	2	-
$V_{ac}$	Tensão de alimentação da ponte	5 V	50 mV
$\mu$	Coefficiente de Poisson do aço	0,301	0,023

<sup>1</sup>Valores estimados para um eixo de aço 1010, com 1" de diâmetro.

As incertezas-padrão são obtidas de ensaios (Leal *et al.*, 2017) e de especificações dos fabricantes (Omega Instruments 1999, Onsemin, 2017). Como  $T$  é dado por um produto/quociente de grandezas, a incerteza combinada  $u(T)$  pode ser calculada por:

$$u(T) = \sqrt{\left(\frac{u(V_{db})}{V_{db}}\right)^2 + \left(\frac{u(E)}{E}\right)^2 + \left(\frac{u(V_{ac})}{V_{ac}}\right)^2 + \left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(\mu)}{\mu}\right)^2} \quad (5)$$

Mais detalhes sobre o cálculo de  $u$  podem ser encontrados em (Balbinot e Brusamarello, 2011). Substituindo as variáveis da Equação 5 pelos dados da Tabela 1, tem-se  $u(T)$  igual a 0,3891 N·m, isto é, aproximadamente 7,86%. A abordagem de considerar as variáveis da Equação 4 em separado acaba introduzindo alguns erros elevados (como o de  $\mu$ ), o que justifica o valor expressivo de  $u(T)$ .

Em relação à incerteza gerada pelo conversor AD, três fatores são levados em consideração (Niskanen e Ahola, 2011): ENL (erro devido à não-linearidade), EDL (erro de linearidade diferencial) e RVE (erro na tensão de referência). Considerando tais fatores independentes, a incerteza gerada pelo ADC é dada por:

$$u(ADC) = \sqrt{ENL^2 + EDL^2 + RVE^2}, \quad (6)$$

em que ENL é igual a  $\pm 5\text{LSB}$ , EDL,  $\pm 7\text{LSB}$ , e RVE é  $\pm 12\text{LSB}$  (Linear Technology Corporation, 2007). O valor máximo de  $V_{db}$  na entrada do ADC, 2,5V, corresponde a um torque de  $\pm 116,26$  kN·m, isto é, cada *bit* do ADC equivale a 0,0138 N·m. Assim, de acordo com a Equação 6, o ADC produz uma incerteza de 0,204 N·m (1,75 ppm) na escala máxima. Ou seja,  $u(ADC)$  é desprezível em relação aos fatores mecânicos e da ponte de *strain gauges*, de modo que a incerteza da medição de torque pode ser considerada  $u(T)$ .

## 4 Resultados

Com a o circuito ADC pronto e o Arduino programado, o sensor de torque pôde ser testado. Os resultados são discutidos nas próximas subseções.

### 4.1 Teste com braço de alavanca

Uma maneira simples de avaliar os dados fornecidos pelo sensor é aplicar perpendicularmente uma determinada força em um braço de alavanca cujas dimensões e material são conhecidos (Brito, 1994). A Figura 10 mostra o equipamento construído para o teste do sensor de torque. Para representar o eixo, uma barra cilíndrica de aço com  $25,4 \pm 0,1$  mm de diâmetro é soldada a um suporte metálico. Uma pequena chapa metálica é soldada ao eixo, de modo a formar um braço perpendicular à barra. Na extremidade livre da chapa, é afixado um suporte para pesos no qual são adicionadas anilhas de massa conhecida. A distância entre o ponto onde a força é aplicada e o centro do eixo é de  $188 \pm 0,1$  mm.

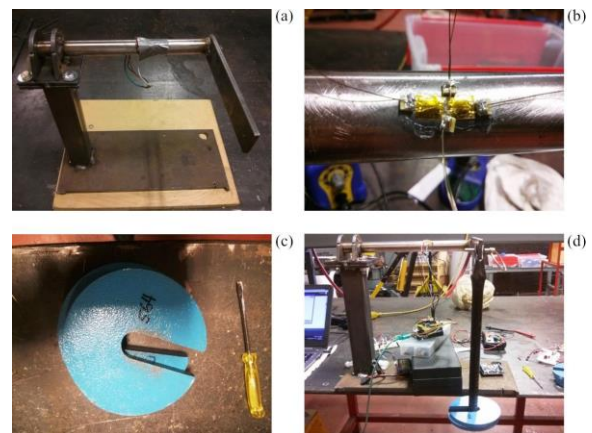


Figura 10. Equipamento para teste de torque. (a) eixo de aço; (b) detalhe dos *strain gauges*; (c) anilhas; (d) Sistema em teste.

Para traçar a curva de histerese, adiciona-se um par de anilhas ao suporte ( $1120 \pm 0,1$  g), mantendo-o em repouso por um intervalo de aproximadamente 10 segundos. Ao fim de cada intervalo, um novo par é acrescentado até que se atinja um total de 10 anilhas no suporte. O processo inverso é feito seguindo o mesmo padrão, isto é, retirando-se um par a cada 10

segundos até o sistema retornar ao estado inicial. Os resultados obtidos são extraídos do cartão SD e traçados no gráfico da Figura 11.

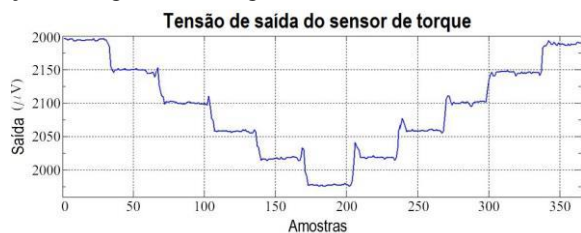


Figura 11. Curva de histerese com passos de torque de 2,06 N·m. Cada passo gera aproximadamente 43 µV na saída.

Nota-se que o teste gera uma curva de histerese simétrica e com degraus aproximadamente iguais (43 µV, em média) para cargas com torque de  $2,06 \pm 1,26 \cdot 10^{-3}$  N·m.

#### 4.2 Comparação com o modelo matemático

Para validar os resultados, é possível comparar o torque medido com os valores teóricos, dado pela Equação 4.

Substituindo os valores da Tabela 1 na Equação 4 e fazendo  $V_{db}$  igual a 43 µV, obtém-se um torque igual a  $1,98 \pm 0,15$  N·m, isto é, uma diferença de cerca de 3,8% em relação ao teste com alavanca. No gráfico da Figura 12, as curvas de histerese teórica e medida podem ser verificadas.

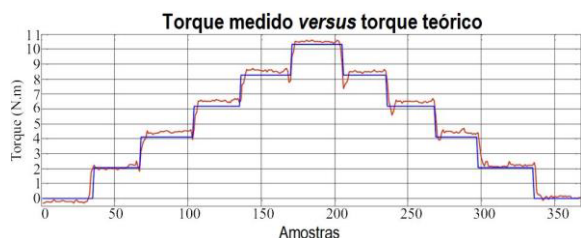


Figura 12. Comparação entre o torque teórico e o torque medido.

#### 4.3 Aplicativo Android (receptor)

O aplicativo Android foi desenvolvido para receber os dados de torque (processados no Arduino) via *Bluetooth* em tempo real, traçando uma curva semelhante à mostrada na Figura 11. Uma captura de tela da aplicação que executa o teste de calibração pode ser vista na Figura 13.



Figura 13. Aplicativo para análise de torque em tempo real.

#### 4.4 Especificações do sensor de torque

A Tabela 2 resume as características principais do sensor de torque final.

Tabela 2. Características do sensor de torque

Parâmetro	Descrição
Entrada do sensor	Ponte <i>Wheatstone</i> completa de <i>strain gauges</i> (4 braços ativos, 350 Ω)
Excitação da ponte	5 V <sub>CC</sub> , regulada
Tensão de alimentação	5-12 V <sub>CC</sub>
Peso	245 g
Dimensões (LxCxA)	71,4 x 85,2 x 59,10 (mm)
Resolução	24 bits
Taxa de amostragem	880 amostras/s
Alcance da antena	36 m
Memória de armazenamento	Até 1 GB
Potência consumida	400mW (em operação) e 15mW (em espera)

### 5 Conclusão

O instrumento final obtido neste projeto operou com desempenho satisfatório, destacando-se também pela versatilidade e baixo custo. Embora empregar diretamente a Equação 4 gere uma incerteza de 7,86%, o teste com o braço de alavanca pode ser utilizado para calibração, adicionando-se uma constante de correção (Dzapo *et al.*, 2004). As especificações do sistema final podem ser verificadas na Tabela 2.

Em relação à instalação, o sistema é compatível com qualquer eixo de máquina rotativa, independentemente do diâmetro, e não requer nenhum receptor especial ou analisador externo, trabalhando com qualquer smartphone comum com sistema operacional Android.

Além disso, o cartão SD pode coletar os dados assim que o Arduino for ligado, fornecendo uma maneira alternativa de armazenar dados para futuros estudos. À medida que o sistema está ligado ao eixo, uma bateria de lítio de 2200 mAh, 7,2 V, fornece energia e garante medição contínua por até 24 h.

Aperfeiçoamentos futuros incluem substituir a bateria por um sistema de alimentação capaz de converter a rotação do eixo em energia, e substituir a plataforma Arduino com os *shields* por uma placa única que contenha toda a eletrônica embarcada.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), entidade do Governo Brasileiro voltada para a formação de recursos humanos; da Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE); do Con-

selho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); e do Grupo de Pesquisa em Robótica da UFS (GPR-UFS). Também gostaríamos de agradecer à Universidade de Ottawa e à *start-up* ZEC Wind Power, cuja parceria possibilitou esta pesquisa.

### Referências Bibliográficas

- IEEE, (2005). IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 15.1a: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN). In IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002). New York, NY: IEEE, p. 600.
- Onsemi, (2017). NCP1117, NCV1117 - 1 . 0 A Low-Dropout Positive Fixed and Adjustable Voltage Regulators [online]. Disponível em: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NCP1117LP-D.PDF> [Acesso em 23 de janeiro de 2018].
- Roving Networks, (2011). Produto RN-42-N Data Sheet Class 2 Bluetooth ® Module. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/rn-42-ds-v2.32r.pdf> [Acesso em 24 de janeiro de 2018].
- Itعاد.cc, (2015). Produto SD Card Shield v3.0 [online] Disponível em: <https://www.itead.cc/stackable-sd-card-shield-v3-0.html> [Acesso em 02 de fevereiro de 2018].
- Arduino.cc, (2018). Site oficial do Arduino [online]. Disponível em: <http://www.arduino.cc/> [Acesso em 10 de janeiro de 2018].
- Baghli, L., Pautex, J.F., Mezani, S. (2010). Wireless instantaneous torque measurement, application to induction motors. 19th International Conference on Electrical Machines, ICEM, pp.1–6.
- Balbinot, A., Brusamarello, V.J. (2011). Instrumentação e Fundamentos de Medidas. 2ª ed. São Paulo: LTC, p. 492.
- Brito, R.M. (1994). Sistema eletro-eletrônico para medição direta de torque em dispositivos girantes utilizando extensômetros de resistência elétrica. Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
- Dzapo, H., Stare, Z., Bobanac, N. (2004). Portable Wireless Measuring System for Monitoring Motor Shaft Parameters. In: Instrumentation and Measurement Technology Conference. Como, Italy: IEEE, p. 901–906.
- Flieh, H., Totoki, E., Lorenz, R. (2017). Dynamic Shaft Torque Observer Structure Enabling Accurate Transient Loss Measurements. In: Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Miami, FL: IEEE, p. 1–8.
- Howitt, I., Jore A., G. (2011). IEEE 802.15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), New Orleans, LA: IEEE.
- Instruments, O., 1999. Application Note 290-1— Practical Strain Gage Measurements. , p.37.
- Kang, H.S., Meneveau, C. (2010). Direct mechanical torque sensor for model wind turbines. Measurement Science and Technology, (21).
- Leal, S. *et al.*, 2017. Determinação de propriedades mecânicas do aço 1010 sob tensão no regime elástico por meio de speckle dinâmico. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, (4), p.1–15.
- Linear Technology Corporation, (2010). Produto LT1460 - Micropower Precision Series Reference Family. Disponível em: <http://www.linear.com/product/LT1460> [Acesso em 10 de janeiro de 2018].
- Linear Techology Corporation, (2007). Produto LTC2420 - 20-Bit µPower No Latency Delta-Sigma ADC in SO-8. Disponível em: [www.linear.com/product/LTC2420](http://www.linear.com/product/LTC2420) [Acesso em 01 de fevereiro de 2018].
- National Instruments, (2014). Measuring Strain with Strain Gages. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/> [Acesso em 10 de janeiro de 2018].
- Niskanen, V., Ahola, J. (2011). Implementing clamp on wireless torque measurement system for rotating shaft applications (UI). In: Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham. UK: IEEE, p. 1–10.
- , M.C.S., Sekhar, A.S. (2015). Detection and monitoring of coupling misalignment in rotors using torque measurements. Measurement, (61), p.111–122.
- Roylance, D., (2000). Shear and torsion. Cambridge, MA: MIT, p.1–14.
- Särkimäki, V. *et al.*, (2006). Applicability of ZigBee technology to electric motor rotor measurements. In: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. SPEEDAM. Taormina, Italy: IEEE, p.137–141.
- Schicker, R., Wegener, G., (2002). Measuring Torque Correctly, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- Thoren, M., (2005). Delta Sigma ADC Bridge Measurement Techniques -Application Note 96. (AN96-20). Milpitas, CA, p.1–20.
- Wire, F.G., (2008). Strain Gages: Users Guide and Technical Reference., Bridgeport, NJ: OMEGACAT, p.89.