

## ANÁLISE DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE DE BAIXO CUSTO EM ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE ENGENHARIA MECÂNICA

Fabio Mazzariol Santiciolli, [fabio@fem.unicamp.br](mailto:fabio@fem.unicamp.br)<sup>1</sup>  
Heron José Dionísio, [heronj.dionisio@gmail.com](mailto:heronj.dionisio@gmail.com)<sup>1</sup>  
Arthur Germano Cardoso, [arthurgcardoso@gmail.com](mailto:arthurgcardoso@gmail.com)<sup>1</sup>  
Eduardo dos Santos Costa, [eduardo.costa@fem.unicamp.br](mailto:eduardo.costa@fem.unicamp.br)<sup>1</sup>  
Fernanda Cristina Corrêa, [fernandacorrea@utfpr.edu.br](mailto:fernandacorrea@utfpr.edu.br)<sup>2</sup>  
Jony Javorski Eckert, [javorski@fem.unicamp.br](mailto:javorski@fem.unicamp.br)<sup>1</sup>  
Mayara Rosa Merege, [mayara.merege@gmail.com](mailto:mayara.merege@gmail.com)<sup>1</sup>  
Franco Giuseppe Dedini, [dedini@fem.unicamp.br](mailto:dedini@fem.unicamp.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unicamp, Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860 - Barão Geraldo - Campinas - SP

<sup>2</sup>Utfpr, Campus Ponta Grossa, Av. Monteiro Lobato - Jardim Carvalho - Ponta Grossa - PR

**Resumo:** *Sistemas de aquisição e controle são fundamentais para execução de variados tipos de experimentos laboratoriais. Nas últimas décadas houve o desenvolvimento de renomados equipamentos dedicados a estas tarefas. Estes produtos, de forma geral, possuem elevado valor agregado por desempenharem atividades especializadas em alto nível de excelência. Sendo assim, o fator financeiro pode inibir o nascimento de estudos ou projetos com baixo orçamento inicial. Com a popularização da eletrônica e consequente expansão do comércio de sistemas microprocessados, muitas tarefas antes executadas com recursos onerosos, tornaram-se possíveis com investimentos mais modestos. No entanto, diante desta mudança no cenário experimental, surge uma importante questão: Os sistemas de baixo custo apresentam resultados confiáveis ou equivalentes aos apresentados pelos sistemas considerados de "excelência"? Este estudo investiga esta questão, apresentando resultados experimentais comparativos entre um hardware microprocessado de baixo custo denominado Arduino e uma plataforma comercial considerada de "excelência". O intuito é demonstrar para comunidade científica quanto os sistemas de baixo custo podem ajudar na realização de muitas etapas de desenvolvimento de produtos e exploração de conceitos técnicos e científicos sem, no entanto, diminuir significativamente a qualidade e a precisão dos resultados finais.*

**Palavras-chave:** *Aquisição de Sinais, Controle, Hardware Livre, Análise Experimental*

### 1. INTRODUÇÃO

Os laboratórios de engenharia mecânica necessitam de sistemas de controle e aquisição de sinais para desempenharem satisfatoriamente estudos experimentais. Tais sistemas vêm sendo desenvolvidos há décadas e encontram-se em um estágio de excelência, por isso, comumente possuem elevado valor financeiro. Este fator pode inibir o nascimento de estudos ou projetos com baixo orçamento inicial.

Com a popularização da eletrônica e consequente expansão do comércio de sistemas microprocessados, muitas tarefas antes executadas com recursos onerosos, tornaram-se possíveis com investimentos mais modestos. Um símbolo deste movimento é o Arduino, criado em 2005 no Instituto Ivrea, na Itália, com o objetivo de permitir estudos e desenvolvimentos de projetos interativos. Sua linguagem de programação é C/C++ e o seu elevado número de bibliotecas permite agilidade em diversas tarefas. A programação de sua placa é feita por meio da conexão USB, sendo o programa armazenado em uma EEPROM dentro do microcontrolador. A distribuição padronizada de seus pinos de comunicação permite a conexão de periféricos denominados *shields*. Por possuir hardware e software abertos, a criação de bibliotecas e *shields*, bem como a produção do próprio Arduino é livre para a comunidade (Faugel e Bobkov, 2013).

A presença deste dispositivo em trabalhos de engenharia é percebida por meio das publicações acadêmicas. Kamogawa e Miranda (2013) propuseram um sistema de controle para válvulas solenoide com aplicação em dispositivos de análise de fluxo, expansível para válvulas rotatórias, microbombas solenoide e bombas de seringa. Neste trabalho foi utilizado o Arduino na versão "Uno" e apenas quatro de suas 14 portas digitais foram ocupadas.

Como outro exemplo, tem-se o desenvolvimento de um sistema de biometria BITalino, auxiliado por Arduino, com integração com sistema operacional Android. Neste trabalho, sensores eletrocardiográficos são colocados em dois dedos de mãos opostas, com o objetivo de capturar a atividade elétrica do coração. Os sinais são adquiridos pelas portas analógicas de um Arduino Mini e posteriormente enviados a uma estação base com sistema operacional Android por meio de Bluetooth (Alves et al, 2013).

Outra aplicação envolvendo as portas analógicas de um Arduino e sua integração com dispositivo Android tem objetivo de reduzir o consumo de energia de um cômodo. Um sensor de núcleo dividido é utilizado para medir a corrente e, assim, a potência de um equipamento ligado à rede elétrica, de modo que o sistema possa ter dados para arbitrar sobre os momentos de funcionamento desnecessário do equipamento, desligando-o para propiciar economia de energia (Shajahan e Anand, 2013).

Dentro deste cenário favorável, Naveenkumar e Krishna (2013), publicaram um trabalho tratando da integração do Arduino com o software de aquisição de dados e controle LabVIEW por meio da “Interface do LabVIEW para Arduino” (LIFA), disponibilizada pela NI. Neste mesmo trabalho analisou-se com sucesso experimentos envolvendo o controle de um motor de corrente contínua, além de medições de sensores de proximidade e luminosidade.

## 2. UMA APLICAÇÃO PARA ENGENHARIA MECÂNICA

O Laboratório de Sistemas Integrados (FEM/Unicamp) tem como uma de suas linhas de pesquisa o estudo de veículos híbridos. Uma das demandas desta área é a caracterização dos parâmetros dos motores elétricos, o que viabiliza o projeto adequado do desempenho dinâmico do veículo, e também dos demais sistemas veiculares (armazenadores elétricos, controladores, trem de potência de combustão, entre outros). Assim, uma bancada experimental se faz necessária para o total conhecimento dos predicados de um determinado motor elétrico.

Em pesquisa bibliográfica, verificou-se que um dinamômetro para motores elétricos dotado de um volante de inércia é útil para a caracterização dos motores elétricos, pois o mesmo impõe um aumento aproximadamente linear da velocidade para um torque constante. Além disto, é possível utilizá-los para emular o comportamento de um veículo elétrico frente a um ciclo normatizado de condução, uma vez que o volante tenha inércia rotacional cineticamente equivalente à inércia longitudinal do automóvel proposto (Fajri et al., 2013).

Assim, foi construída uma bancada dinamométrica a partir do recondicionamento de um volante de inércia disponibilizado ao término de projetos anteriores. Foram executados trabalhos de limpeza, lubrificação e adaptação mecânica para a nova aplicação. Posteriormente, fez-se necessária a introdução de dispositivos de controle e aquisição dos sinais envolvidos. Dentre os recursos disponíveis estavam um sistema de aquisição tradicional e plataformas Arduino, assim um estudo comparativo deveria ser feito antes da aplicação final. Este contexto local veio a incentivar a execução do presente trabalho.

## 3. OBJETIVO

O presente trabalho tem o objetivo de aprofundar a análise do uso de uma placa Arduino como um sistema de aquisição de sinal e controle, com baixo custo e potencial utilidade para experimentos de engenharia mecânica. Especificamente, pretende-se adquirir a curva da corrente em função da rotação de um motor elétrico de corrente contínua sem escovas (*Brushless DC*), de modo a gerar uma carta característica deste motor.

Em uma descrição experimental breve, primeiramente são executadas aquisições dos sinais de corrente e rotação por meio de um Arduino Uno para diferentes condições de torque e para cada sentido de rotação, posteriormente os experimentos são replicados utilizando-se um sistema de aquisição tradicional. Por fim, os sinais gravados são processados e comparados.

De modo a relatar este ensaio, este texto inicialmente descreve os materiais utilizados, seguido da metodologia experimental, encerrando-se com resultados e conclusões.

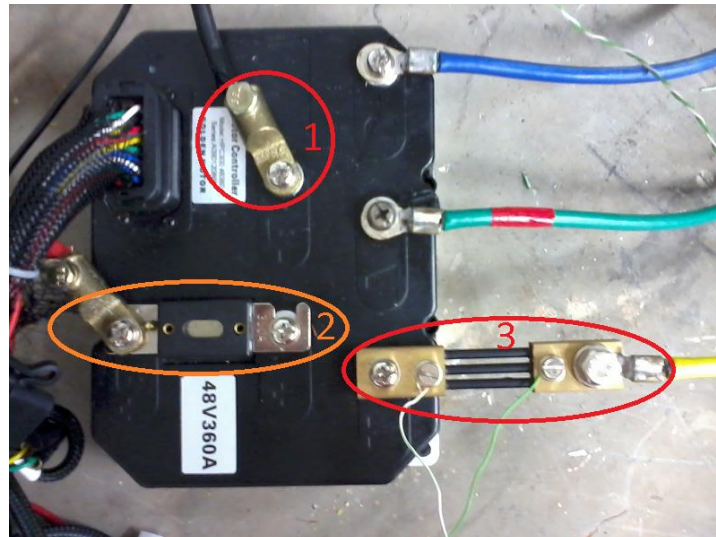
## 4. MATERIAIS

O motor a ser estudado é do tipo *Brushless DC*, modelo HPM-5kW, adequado para aplicações em tração de veículos híbrido e elétricos. Possui um torque nominal de 14Nm. Três cabos alimentam cada fase deste motor com a corrente oriunda do controlador. Um quarto cabo carrega o sinal de posicionamento do rotor para o controlador.

O controlador em questão é o HPC300H. Alimentado por uma tensão contínua de 48V, possibilita a escolha do sistema de armazenamento de energia elétrica com foco em aplicações veiculares, uma vez que esta tensão é um múltiplo da tensão das baterias automotivas (12V). Recebe como informação do usuário uma tensão de 0 a 5V referente à intensidade do torque desejado, de 0 a 100%.

Apesar da possibilidade do uso de baterias automotivas como fonte de energia para o controlador, empregou-se uma fonte de tensão contínua Shekonic WWL-PS conectada à rede elétrica trifásica, de modo a eliminar variabilidades oriundas da dinâmica eletroquímica natural das baterias.

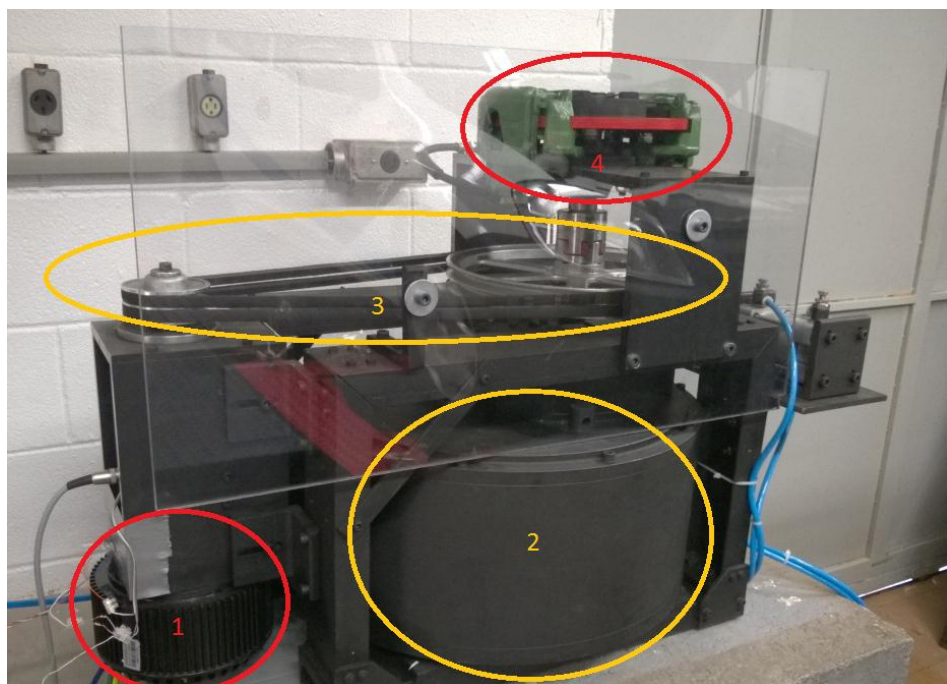
Para a medição da corrente, associou-se um resistor de precisão *Shunt* A2100 SASSI em série com uma das fases de saída do controlador. Este resistor impõe uma queda de tensão de  $\pm 60\text{mV}$  para uma corrente de  $\pm 150\text{A}$ . Esta queda de tensão é então amplificada por um dispositivo Phoenix Contact mini MCR-SL-SHUNT-UI-NC, originando assim os sinais adquiridos. A associação entre o controlador e o resistor de precisão está exposta na Fig. 1.



**Figura 1.** Em “1”, tem-se o polo negativo da fonte, enquanto o polo positivo, regulado para 48V possui um fusível de proteção, destacado em “2”. Já em “3” é mostrada a inserção do resistor de precisão sobre uma das fases.

Já para a medição da velocidade angular do motor, é associado ao seu eixo um disco com 6 descontinuidades igualmente espaçadas. Um sensor óptico de proximidade Opb742 é posicionado perpendicularmente a este disco, produzindo um sinal de saída pulsado, modulado em função da passagem das descontinuidades. O pós-processamento destes pulsos permite a inferência sobre a referida velocidade.

Quanto à construção mecânica, o motor é ligado ao volante de inércia por meio de uma redução de polias e correias com relação de 4:1. Um freio a disco com acionamento hidropneumático auxilia a dissipação da energia cinética do volante ao fim de cada seção de experimento. A montagem resultante do sistema experimental está ilustrada na Fig. 2.



**Figura 2.** Bancada experimental. Em destaque, tem-se (“1”) motor elétrico *Brushless DC*, (“2”) disco de inércia, (“3”) transmissão de polias e correias e (“4”) freio hidropneumático.

Para aquisição de dados primeiramente foi utilizado um Arduino Uno. Seu custo é estimado entre US\$30,00 e US\$35,00. Seus dados principais estão na Tab. 1.

Posteriormente foi utilizada a Aquisição A, relativa a uma placa de entradas analógicas tradicional, com amplitude de  $\pm 10V$ , grau de isolamento entre canais de 250 Vrms e taxa de aquisição de 50 kS/s/ch. Seu custo estimado é de aproximadamente US\$1200,00. Maiores detalhes não serão abordados, pois não é feita uma análise completa de seus predicados e suas aplicações de ponta.

**Tabela 1. Características Arduino Uno (Arduino, 2014)**

Microcontrolador	ATmega328
Tensão de Operação	5V
Portas Digitais (entrada e saída)	14 (das quais 6 fornecem sinal PWM)
Portas Analógicas	6
Memória Flash	32KB (ATmega328)
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidade de Clock	16MHz

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

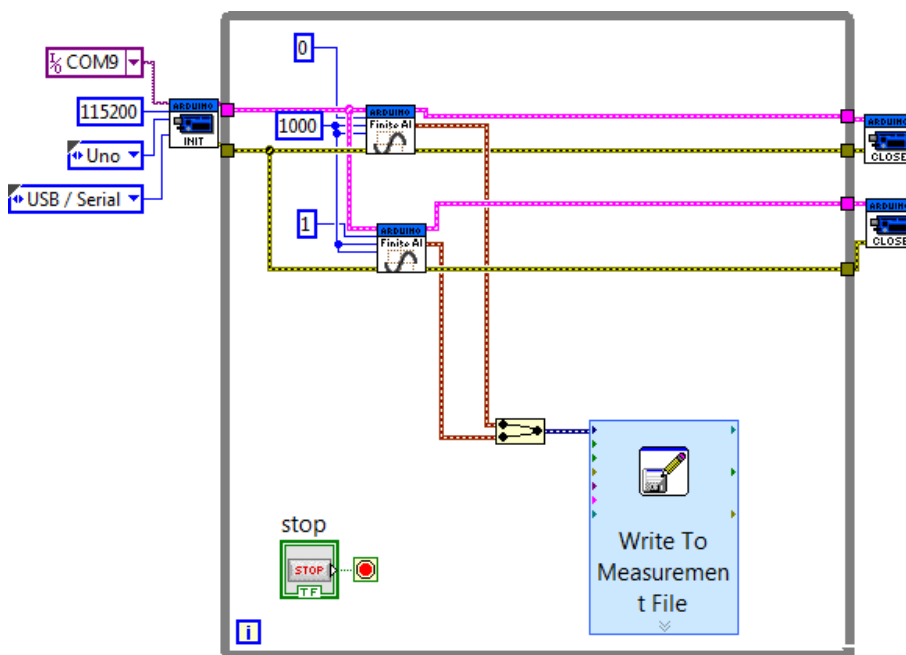
Durante os ensaios, buscou-se analisar o perfil de correntes desempenhado pelo motor elétrico em função de sua rotação quando solicitado entre 30% a 70% de seu torque, com incrementos de 10%. Para tal, em ambos os casos, um segundo Arduino Uno foi dedicado para enviar ao controlador do motor elétrico um sinal em PWM com amplitude de 5V mas com razões cíclicas respectivas de 30% a 70%, com incrementos de 10%. Cada experimento é executado com o motor em sentido horário de rotação e posteriormente replicado com sentido anti-horário.

De modo a garantir condições iguais aos testes, verificou-se a cada experimento que a fonte de tensão possuía o valor de 48,0V indicado em seu painel. Para os casos com 30%, 40% e 50% de torque, o motor partia do repouso. Entretanto, para os casos de 60% e 70% de torque, pôde-se garantir a carga desejada no motor apenas após 300rpm, dado o escorregamento das correias durante a partida.

As aquisições foram realizadas com o apoio do software LabVIEW 2012. Buscou-se a implementação de diagramas de blocos básicos, com o mínimo de elementos de interface com o usuário de modo a gerar a menor quantidade possível de perturbações ao desempenho do processamento das aquisições. Para o monitoramento da velocidade ao longo do experimento, foi utilizado o software nativo do controlador HPC300H, com auxílio da conexão USB do mesmo.

#### 3.1. Experimento com Arduino Uno

O algoritmo de aquisição de sinais implementado no LabVIEW foi auxiliado pela interface com Arduino LIFA (NI, 2014), como ilustrado na Fig. 3. Este algoritmo necessita de informações acerca da conexão utilizada pela placa do Arduino, taxa de transmissão e tipo de Arduino. Foram utilizadas duas entradas analógica das 6 disponíveis, sendo o pino analógico 0 responsável pela aquisição dos sinais do sensor ótico para a inferência da velocidade do motor e o pino analógico 1 utilizado para aquisição do sinal do resistor de precisão conectado a uma das fases do motor. Cada loop de aquisição compreende a leitura de 1000 amostras em um segundo. Por fim os sinais são multiplexados e arquivados no disco rígido do computador, a fim de serem pós-processados em MATLAB.



**Figura 3. Algoritmo de interface entre Arduino e LabVIEW**

### 3.2. Experimento com Aquisição A

O laço lógico utilizado para Aquisição A é mais simples, contém apenas um “DAQ Assistant” com dois sinais, imediatamente enviados para gravação em disco rígido e posterior pós processamento em MATLAB. Assim, foram utilizadas duas entradas analógica das quatro disponíveis, sendo novamente o pino analógico 0 responsável pela aquisição dos sinais do sensor ótico para a inferência da velocidade do motor e o pino analógico 1 utilizado para aquisição do sinal do resistor de precisão conectado a uma das fases do motor. A frequência de aquisição foi ajustada para 1kHz e a cada loop eram aquisitadas 1000 leituras por entrada analógica utilizada.

## 4. RESULTADOS

Os resultados para corrente RMS por fase em função da rotação do motor podem ser observados na Fig. 4 para o sentido de rotação horário e na Fig. 5 para o sentido de rotação anti-horário. O método de medição por Arduino Uno indica valores ligeiramente superiores em relação aos valores oriundos do método que emprega a Aquisição A. Pode-se perceber que os gráficos apresentam diferenças mais perceptíveis a partir de velocidades intermediárias, como 500rpm. Ambos os gráficos são semelhantes entre si, o que indica que o motor tem desempenho similar para ambos os sentidos de rotação.

É possível notar que há um incremento comum entre as curvas de corrente. Isto se deve ao fato das análises ocorrerem com incrementos de 10% de torque. Como a corrente é diretamente relacionada ao torque, a visualização deste fenômeno indica o bom desempenho do conjunto controlador/motor.

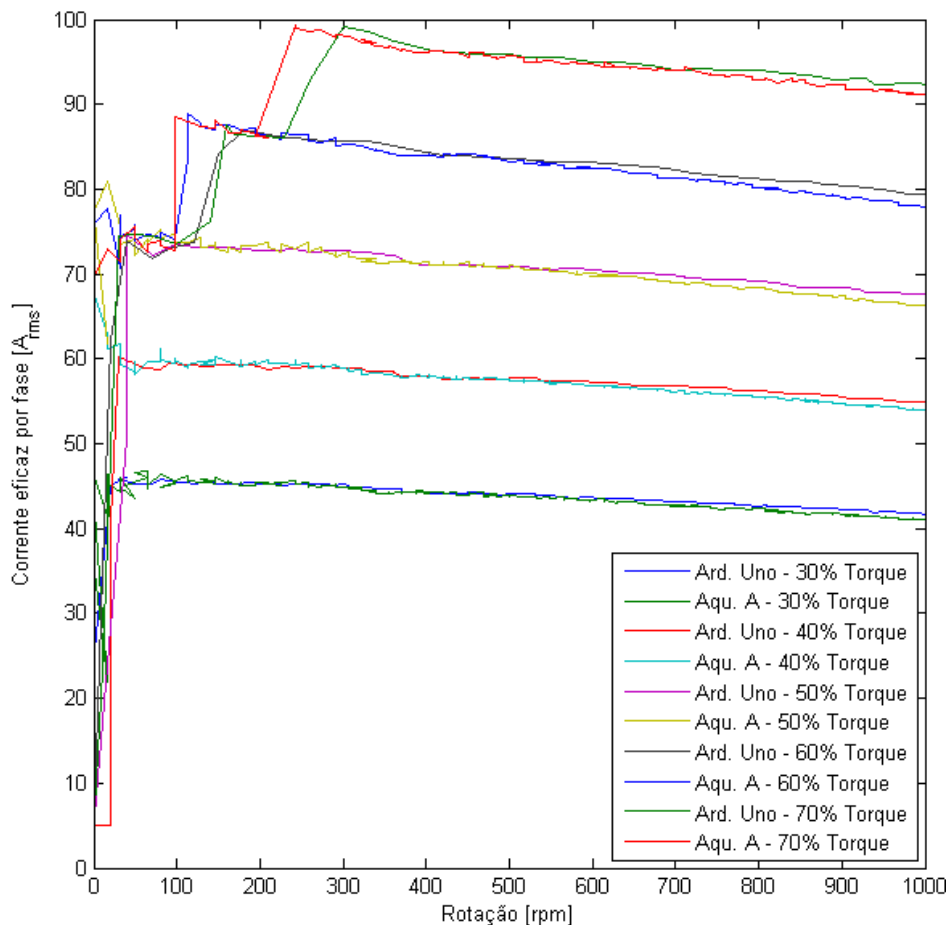


Figura 4. Resultados para corrente eficaz por fase em função da rotação no sentido horário

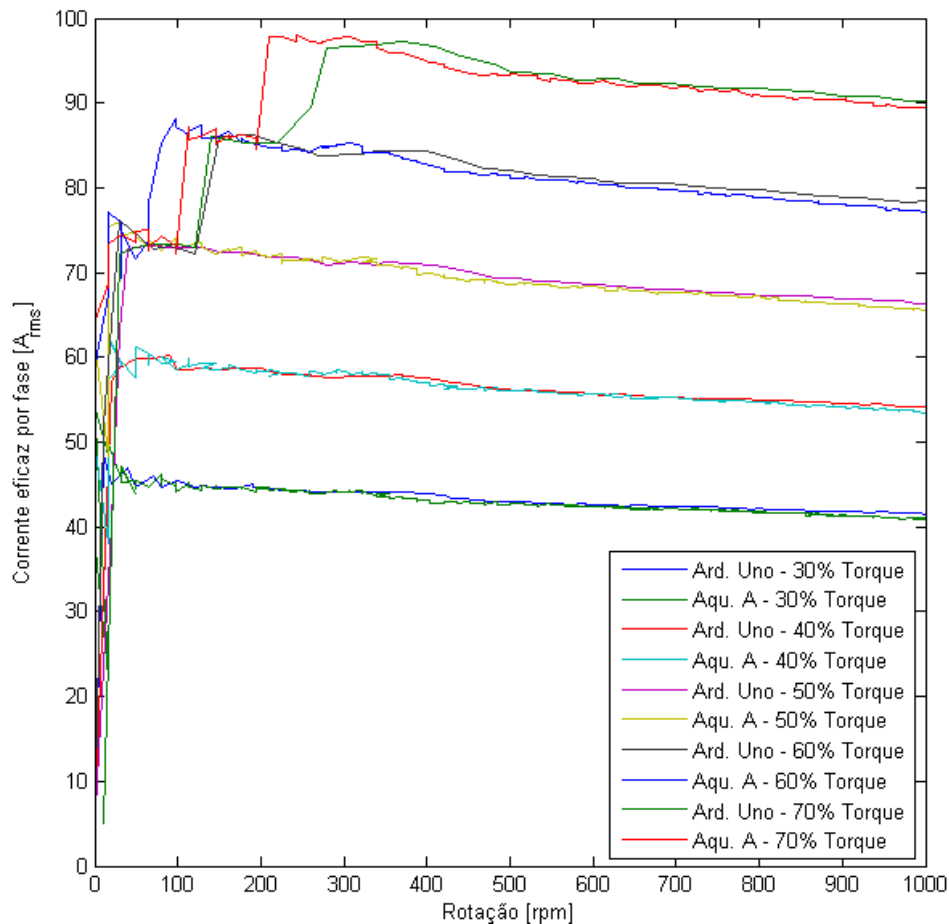


Figura 5. Resultados para corrente eficaz por fase em função da rotação no sentido anti-horário

## 5. CONCLUSÕES

Verificou-se que há sucesso no uso do Arduino Uno como alternativa de baixo custo para aquisição de dados de experimento em laboratório de engenharia mecânica. Porém algumas ressalvas devem ser feitas. Este trabalho propõe um ensaio relativamente lento para aplicações em engenharia, com aquisições a 1kHz. Isso é dado pelas particularidades do sistema, que envolve um motor elétrico de potência moderada acoplado a um volante de inércia. Portanto as conclusões deste trabalho não estão aprofundadas o suficiente para serem extrapoladas para problemas mais rápidos que o apresentado. Propõe-se, então, que em trabalhos futuros sejam analisados problemas com transientes mais velozes para que seja indicado o verdadeiro limite de desempenho da aquisição de dados por meio do Arduino Uno.

Depois que as curvas se estabilizam, observa-se uma diferença máxima de 3% entre as curvas medidas. Desta forma, indica-se para trabalhos futuros investigações sobre a origem desse erro, revelando se ele é nativo do sistema de aquisição empregado, dos métodos de medição, ou se ele é oriundo de influências do procedimento experimental.

Por fim, é possível afirmar que a diferença de 3% observada pode ser compensadora para projetos de baixo orçamento quando analisado o custo de cada sistema de aquisição. Esta é uma informação importante para diversos setores da engenharia que lidam com condições similares às analisadas, além da didática na engenharia, que muitas vezes conta com orçamento restrito. Outros beneficiados são as atividades extracurriculares, projetos de iniciação científica, mestrado e doutorado sem apoio de reserva técnica.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro de CAPES, CNPQ e CPFL

## 7. REFERÊNCIAS

- Alves, A., Silva, H., Lourenço, A., 2013, "Bitalino: A biosignal acquisition system based on the arduino." Proceedings of the International Conference on Biomedical Electronics and Devices, Vol. 1, Barcelona, Spain, pp. 261-264.
- Arduino, 2013 Arduino Board Uno. 22 de fevereiro de 2014 < <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>>.
- Fajri, P., Ahmadi, R. and Ferdowsi, M., 2013, "Control approach based on equivalent vehicle rotational inertia suitable for motor-dynamometer test bench emulation of electric vehicles." Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), IEEE International, Vol. 1, Chicago, USA, pp. 1156 - 1159

- Faugel, H., and Bobkov, V., 2013, "Open source hard-and-software: using Arduino boards to keep old hardware running." Fusion Engineering and Design, Vol. 88, No. 6, pp. 1276-1279.
- Kamogawa, M.Y., and Miranda, J.C.. 2013, "Uso de Hardware de Código Fonte Aberto "Arduino" para Acionamento de Dispositivo Solenoide em Sistemas de Análises em Fluxo." Química Nova Vol. 36, No. 8, pp. 1232-1235.
- Naveenkumar, R., and Krishna, P., 2013. "Low Cost Data Acquisition and Control using Arduino Prototyping Platform and LabVIEW." International Journal of Science and Research, Vol. 2, No. 2, pp 366-369.
- NI, 2014. "NI LabVIEW Interface for Arduino Toolkit". 27 Abr. 2014 <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/209835>>
- Shajahan, A. H., and Anand, A., 2013, "Data acquisition and control using Arduino-Android Platform: Smart plug." International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, IEEE, Vol. 1, Chennai, India, pp. 241-244.

## 8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

# FEASIBILITY ANALYSIS OF LOW COST ACQUISITION AND CONTROL SYSTEM IN EXPERIMENTAL STUDIES OF MECHANICAL ENGINEERING

Fabio Mazzariol Santiciolli, [fabio@fem.unicamp.br](mailto:fabio@fem.unicamp.br)<sup>1</sup>  
Heron José Dionísio, [heronj.dionisio@gmail.com](mailto:heronj.dionisio@gmail.com)<sup>1</sup>  
Arthur Germano Cardoso, [arthurgcardoso@gmail.com](mailto:arthurgcardoso@gmail.com)<sup>1</sup>  
Eduardo dos Santos Costa, [eduardo.costa@fem.unicamp.br](mailto:eduardo.costa@fem.unicamp.br)<sup>1</sup>  
Fernanda Cristina Corrêa, [fernandacorrea@utfpr.edu.br](mailto:fernandacorrea@utfpr.edu.br)<sup>2</sup>  
Jony Javorski Eckert, [javorski@fem.unicamp.br](mailto:javorski@fem.unicamp.br)<sup>1</sup>  
Mayara Rosa Merege, [mayara.merege@gmail.com](mailto:mayara.merege@gmail.com)<sup>1</sup>  
Franco Giuseppe Dedini, [dedini@fem.unicamp.br](mailto:dedini@fem.unicamp.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unicamp, Mendeleev Street, 200 - CEP 13083-860 - Barão Geraldo - Campinas - SP - Brazil

<sup>2</sup>Utfpr, Campus Ponta Grossa, Av. Monteiro Lobato - Jardim Carvalho - Ponta Grossa - PR – Brazil

**Abstract.** Acquisition and control systems are essential for implementation of various types of laboratory experiments. Over recent decades leading equipment dedicated to these tasks were developed. These products, in general, have high value-added for performing activities specialized at a high level of excellence. Thus, the financial factor can inhibit the birth of studies or projects with low initial budget. With the popularization of electronic and consequent expansion of trade in microprocessor systems, many tasks once performed with costly resources are possible with modest investments. However, before this change in the experimental setting, an important question arises: Are low-cost systems reliable or equivalent to those systems considered "excellent"? This study investigates this issue by presenting comparative experimental results between a low-cost hardware microprocessor called Arduino and a commercial platform considered "excellence". The intent is to demonstrate the scientific community that low-cost systems can help in accomplishing many steps of product development and exploitation of technical concepts without, however, diminish the quality and accuracy of the final results.

**Keywords:** Signal Acquisition, Control, Free Hardware, Experimental analysis