

## SISTEMA MICROCONTROLADO DE CONTROLE DE VIBRAÇÃO DE EIXOS MECÂNICOS DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS AGRÍCOLAS

Luiz Antonio Rasia, [rasia@unijui.edu.br](mailto:rasia@unijui.edu.br)<sup>2</sup>  
Cristiano Osinski, [cristiano\\_osinski@hotmail.com](mailto:cristiano_osinski@hotmail.com)<sup>1</sup>  
Antonio Carlos Valdiero, [Valdiero@unijui.edu.br](mailto:Valdiero@unijui.edu.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DCEEng-UNIJUI, Rua do Comercio, 3000, 98700.000- Ijuí-RS

<sup>2</sup>UNIJUI, Campus Panambi, Rua Prefeito Rudi Franke, Nº 540, 98280000 – Panambi-RS

**Resumo:** Este trabalho usa conceitos, modelos matemáticos e simulações computacionais para calibrar eixos mecânicos de máquinas e equipamentos agrícolas. Emprega-se o conceito de Kernel integrado em microcontroladores com arquitetura RISC que executam Task pré-definidas monitorando as vibrações dos eixos através de sensores piezoelétricos, sensores térmicos e sensores de rotação especialmente arrançados. Os modelos são implementados em linguagem C específica para os núcleos microcontroladores usados. O sistema analisa e condiciona as informações obtidas, acionando um circuito drive de potência que identifica os pontos de ajuste de pesos nos eixos. Os dados do ajuste são armazenados em um SD card para posterior interpretação em software específico. Os primeiros resultados estão sendo usados para implementar e aperfeiçoar um ambiente integrado de testes de laboratório de eixos mecânicos desgastados. A interface entre a máquina e o homem é feita através de um display de cristal líquido. Os primeiros testes realizados com o protótipo eletrônico mostrou que eixos com diferentes pesos e desbalanceados apresentam sinais de saída muito parecidos quando comparados entre si mas são rapidamente diferenciados quando se modifica a sensibilidade dos sensores piezoelétricos de vibrações através de ajustes no programa gerenciador.

**Palavras-chave:** mecatrônica; sensores e atuadores; instrumentação inteligente; circuitos integrados programáveis.

### 1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta os resultados teórico e experimental de um sistema eletrônico para detectar automaticamente o desbalanceamento de eixos mecânicos em máquinas e equipamentos agrícolas.

Existem diferentes possibilidades de implementação de placas eletrônicas para esta finalidade. Neste trabalho experimental usa-se sensores piezoelétricos para medir o desbalanceamento de eixos mecânicos e um circuito simples de condicionamento de sinais implementados em linguagem C em microcontroladores com arquitetura RISC.

O balanceamento de eixos e rotores mecânicos tornou-se indispensável devido à necessidade de diminuir o ruído, vibração ou mesmo a parada dos equipamentos causados pelo desbalanceamento ou rompimento de eixos. A NBR 8007/83 diz que o balanceamento pode ser obtido até certo limite uma vez que o rotor ou eixo possuirá um desbalanceamento residual. Este desbalanceamento deve ser reduzido a limites razoavelmente baixos conseguindo-se com isto um compromisso ótimo entre o ponto de vista econômico e teórico sobre a qualidade do balanceamento. Por outro lado, a NBR 8008/83 diz que o desbalanceamento é aquela condição que existe em um rotor, quando forças e movimentos vibratórios são imprimidos em seus mancais, por forças centrífugas que surgem quando o centro de massa do rotor não coincide com o seu centro geométrico. De outro modo não é fácil reconhecer o desbalanceamento de um rotor e as vibrações de uma máquina sob determinadas condições de operação funcional. A amplitude das vibrações sofre influências de vários fatores como a massa vibratória da carcaça e sua fundação ou estrutura, rigidez dos mancais, aproximação das velocidades de operação funcional em relação as diferentes frequências de ressonância do mecanismo.

O desbalanceamento é a distribuição assimétrica de massa em torno do eixo de rotação do sistema causado por diferentes fontes, como por exemplo: configuração assimétrica, inclusões ou vazios em peças forjadas ou fundidas, distorções permanentes térmicas ou devido a esforços mecânicos, incrustações de materiais indesejáveis, empenamento do eixo, desalinhamento entre seus componentes, folga nos mancais, desgaste ou corrosão ao longo do tempo. Em síntese, um corpo rotativo desbalanceado causará o surgimento de forças nos mancais e na estrutura da máquina bem como efeitos de vibrações. Desse modo, para qualquer rotação estabelecida ou ajustada dependem, essencialmente, das proporções geométricas e da distribuição de massa do rotor e máquina bem como da rigidez dos mancais e de sua

estrutura. Estes efeitos além de aumentarem o nível de vibração da máquina rotativa, transmitem forças aos mancais ou mesmo a estruturas vizinhas do equipamento, reduzindo a vida útil dos mancais, produzindo quebras inesperadas de eixos e, conseqüentemente, acabamento irregular do produto final. Portanto; um produto balanceado tem a sua qualidade, segurança funcional e vida útil aumentados, tornando-se um produto final altamente competitivo no mercado.

## 2. DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Neste trabalho o conjunto eletrônico desenvolvido usa um sensor tipo cápsula piezoelétrica montado sobre uma configuração de placas de circuito impresso implementada a partir dos conceitos propostos por Rasia *et al.* (1999), especialmente, desenvolvida para aplicações no protótipo. O desbalanceamento do eixo, quando em funcionamento, é detectado a partir de uma tensão mecânica aplicada sobre os sensores piezoelétricos os quais respondem em forma de sinais alternados de tensão elétrica na entrada analógica do microcontrolador. O microcontrolador lê estes sinais e condiciona os resultados indicando as vibrações do eixo mecânico em um display ou armazenando no cartão de memória os valores para posterior análise, através de softwares específicos para tratamento de dados.

É possível fazer o ajuste manual da sensibilidade de captura dos sinais do sensor piezoelétrico através de um potenciômetro montado sobre o painel da caixa protetora do circuito.

### 2.1. Princípio Básico do Balanceamento

O princípio básico do balanceamento é o de gerar esforços que compensem (anulem) o efeito das forças centrífugas,  $F_c$ , geradas. Neste trabalho é considerada somente a situação em que um rotor opera a uma velocidade,  $\omega$ , em uma órbita de raio,  $r$ , sendo excitado por uma massa desbalanceadora,  $m_d$ . A massa desbalanceadora, neste caso específico, são colocadas ou retiradas das flanges acopladas ao eixo de giro do protótipo experimental. Este sistema descrito gera uma força centrífuga dada pela Eq. (1).

$$c = m_d r \omega^2 \tag{1}$$

Como a massa desbalanceadora é adicionada ou retirada através de parafusos à compensação é feita em um único plano chamado plano de compensação. A literatura mostra que o desalinhamento ocorre quando o eixo principal de inércia de um rotor encontra-se deslocado, porém paralelo em relação ao eixo de rotação do mesmo.

A Figura 1 ilustra a dinâmica do conjunto montado baseado na estrutura conhecida como modelo Jeffcott de rotor dado por Pereira (2005).

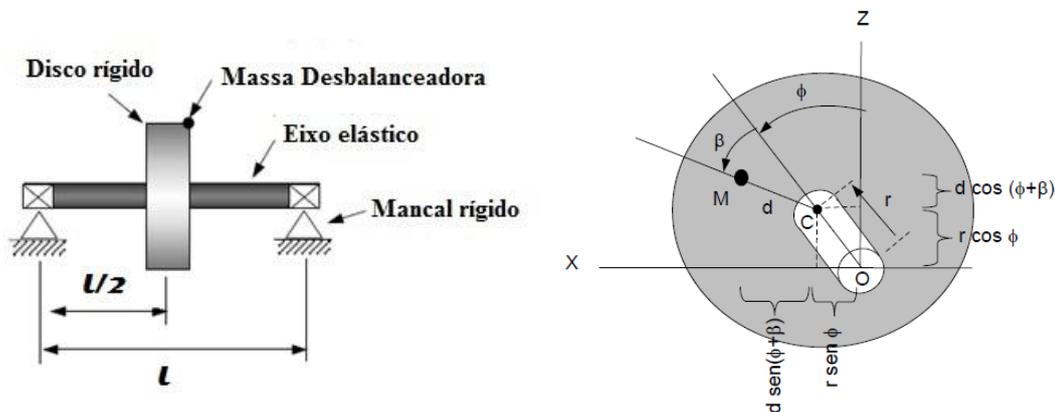


Figura 1.(a) Modelo de rotor montado.

Figura 1.(b) Rotor executando um movimento de precessão.

No modelo considerado surgem velocidades críticas no eixo visto que o disco rígido (flange de ferro usinado) modifica o seu movimento devido as massas desbalanceadoras adaptadas. Existem, na flange, pequenos furos para receberem as massas desbalanceadoras. Assim, quando os eixos atingem velocidades críticas, controladas através de um inversor de frequência, as amplitudes das órbitas ou trajetórias dos movimentos assumem formas complexas e diferentes conforme sugere Pereira (2005). Estes movimentos são caracterizados como de precessão retrógrada ou inversa (backward whirl) e são os que causam problemas mais destrutivos em máquinas rotativas podendo ou não serem sincronizados.

As equações diferenciais que descrevem o movimento do centro geométrico de coordenadas (X,Z) do disco, no caso, flange são dadas pela Eq. (2) e Eq. (3).

$$m\ddot{X} + c\dot{X} + kX = m\omega^2 \tag{2}$$

$$m\ddot{Z} + c\dot{Z} + kZ = m\omega^2 d \cos\omega t \quad (3)$$

onde  $\omega t = (\phi + \beta)$ ,  $m$  é a massa do disco,  $k$  a rigidez do eixo e  $c$  o amortecimento viscoso do conjunto. As Eq. (2) e Eq. (3) para o movimento podem ter a solução dada por:

$$X = r \sin(\omega t - \beta) \quad (4)$$

$$Z = r \cos(\omega t - \beta) \quad (5)$$

As equações básicas descritas neste trabalho podem ser deduzidas e simplificadas para diferentes condições funcionais do conjunto proposto.

## 2.2. Descrição Geral do Protótipo de Balanceamento de Eixos

Nesta seção, é detalhado o processo de montagem da máquina mostrando a integração dos sensores e demais componentes em um só sistema.

A máquina consiste de uma estrutura de ferro, projetada para abrigar um motor trifásico juntamente com um inversor. O motor é responsável pelo giro do eixo de 1m de comprimento e  $\frac{3}{4}$  de polegada montado sobre mancais, na parte de cima da estrutura. Na parte inferior da estrutura metálica, abaixo do eixo, encontram-se os sensores piezelétricos acoplados. Um disco de ferro foi acoplado ao eixo juntamente com uma estrutura para alojar um sensor infravermelho que detecta a posição de giro do eixo. O sistema de comando e controle fica dentro de uma caixa plástica conforme ilustra a Fig. 2.



Figura 2. Sistema de comando e controle.

O circuito foi desenvolvido baseado em trabalhos publicados por Rasia *et al.* (2011) usando conceitos de automação e robótica apresentados por Valdiero *et al.* (1999).

A figura 3 ilustra, através de um diagrama de blocos, a estrutura funcional do protótipo desenvolvido neste trabalho.

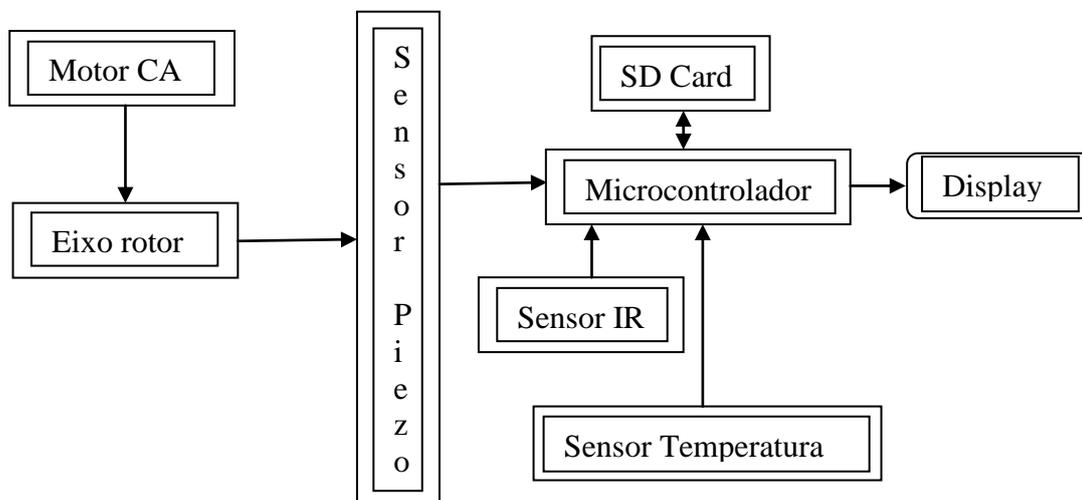


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema de detecção de vibrações.

Um algoritmo específico para detecção de vibrações foi implementado em um microcontrolador ATMEGA de 8 bit o qual gerência os resultados das medidas, mostrando em um display de cristal líquido o nível elétrico dos pulsos de vibração capturados pelo sensor piezoelétrico e convertidos escalar e adimensionalmente. Os dados são armazenados em um cartão de memória tipo SD card para posterior interpretação em programas de análise de dados. Neste protótipo não foram incorporados filtros especiais para aquisição dos dados e análise dos sinais, somente foram usados os recursos simples de limitação do sinal de entrada provenientes do sensor piezoelétrico usando um diodo de sinal em paralelo com o cabo blindado. Este arranjo elétrico garante que o sinal de saída não exceda um nível predeterminado de tensão não distorcendo o restante do sinal amostrado e evitando danificar a entrada analógica do microcontrolador.

Um circuito de potência, não mostrado, foi montado para acionar uma lâmpada de xenônio com pulsos de disparo controlados para se observar “estaticamente” o ponto de desbalanceamento do eixo.

O controle de velocidade do eixo é feito através de um inversor de frequência trifásico responsável por simular situações reais de funcionamento do conjunto em diferentes velocidades. O comando do sistema é feito por meio do microcontrolador que executa tarefas pré-definidas pelo programador. Um sensor de temperatura foi acoplado aos mancais para registrar o aquecimento do eixo.

Um relógio foi implementado via software para mostrar o tempo de funcionamento da máquina ao operador. Todos os dados obtidos dos sensores são armazenados em um cartão de 4GB. A comunicação e transferência de dados também podem ser feita através da porta serial do microcontrolador.

A Figura 4 mostra um fluxograma de funcionamento do programa codificado em linguagem C no microcontrolador usado.

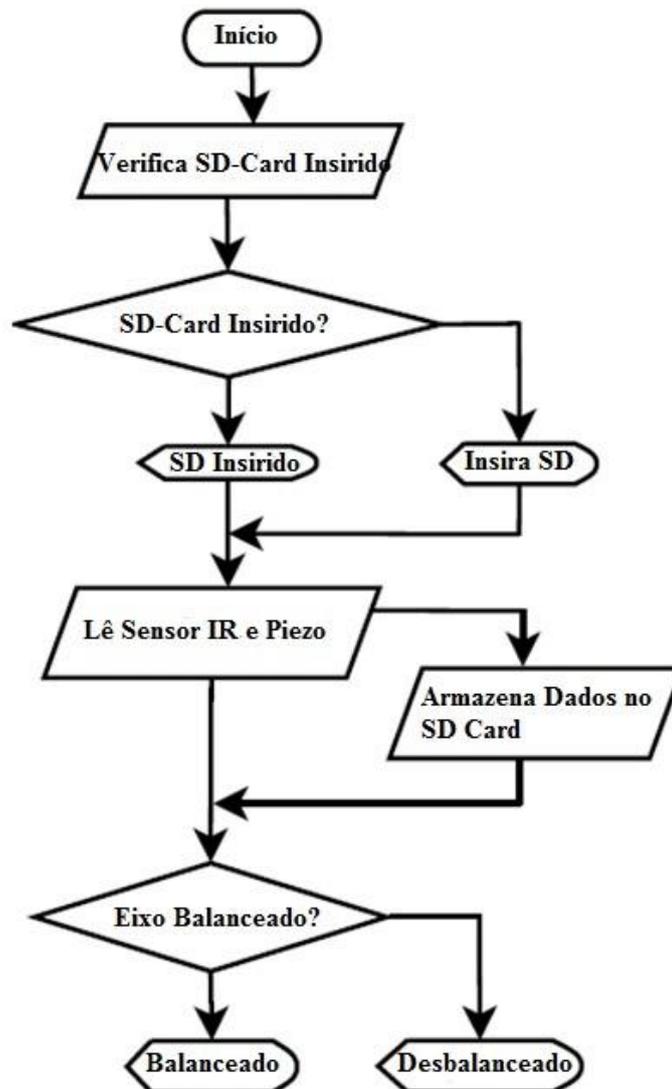


Figura 4. Fluxograma funcional do programa implementado.

A Figura 5 mostra uma fotografia do protótipo mecânico com detalhes para a posição onde foi instalado o sensor piezoelétrico para monitoramento das vibrações do eixo rotor.



Figura 5. (a) Protótipo experimental do balanceador de eixos e detalhes de instalação do sensor piezoelétrico.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observou-se que os sinais do sensor piezoelétrico sofrem atenuações e algum tipo de interferência quando entram no amplificador operacional e, conseqüentemente, na entrada analógica do microcontrolador. Estas interferências produzem ruídos e geram algum tipo de efeito nos resultados obtidos durante o processamento dos sinais elétricos e sua conversão. Por outro lado, as naturezas térmicas dos ruídos estão sendo monitoradas através de um sensor de temperatura que, no caso específico deste teste, nunca foi superior a temperatura ambiente na faixa de  $27^{\circ}\text{C}$ . Neste trabalho não foram plotados gráficos destes resultados. De outro modo, os ruídos impulsivos por terem natureza não contínua e consistirem de pulsos irregulares de grande amplitude estão sendo os mais difíceis de serem monitorados e previstos. Dentre as prováveis fontes destes ruídos incluem-se aqui os distúrbios elétricos externos e algum outro tipo de provável falha de filtragem as quais devem ser identificadas e corrigidas à medida que novos testes forem sendo realizados.

A Figura 6 mostra os testes iniciais realizados no protótipo à temperatura ambiente em uma bancada de laboratório. As amostras foram adquiridas durante um período de tempo médio de meio minuto de funcionamento do equipamento e armazenadas em um SD-card. Posteriormente, estes dados foram importados para um software e gerados os gráficos mostrados.

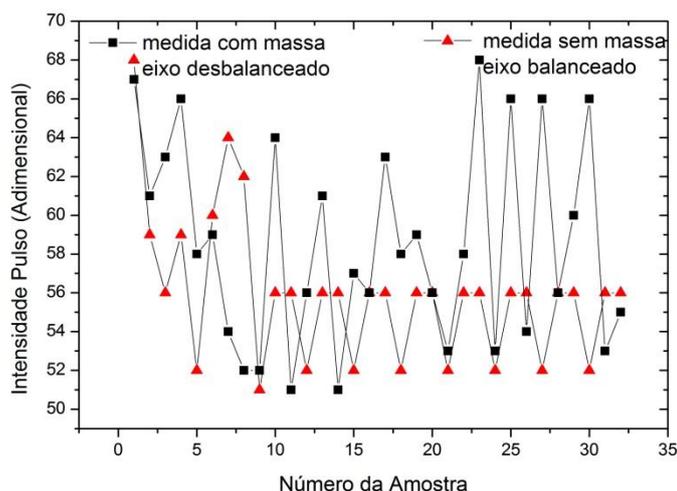


Figura 6. Gráficos comparativos de balanceamento de eixos ajuste menu 5.

Os resultados mostram um comportamento não linear dos sinais capturados pelo sistema quando o eixo gira com uma massa de prova colocada no flange. Esta massa extra é responsável por modificar o momento de inércia do eixo. Quando o sistema gira sem a massa de prova nota-se um comportamento mais estável indicativo de que o sistema está balanceado conforme indica o gráfico da Fig. 6. A Fig. 7 e Fig. 8 mostram outros ajustes manuais de sensibilidades feitas através de menus incorporados no programa e controlados manualmente através do ajuste de um potenciômetro. Os ajustes podem ser feitos via programação o que torna o sistema automatizado após a calibração.

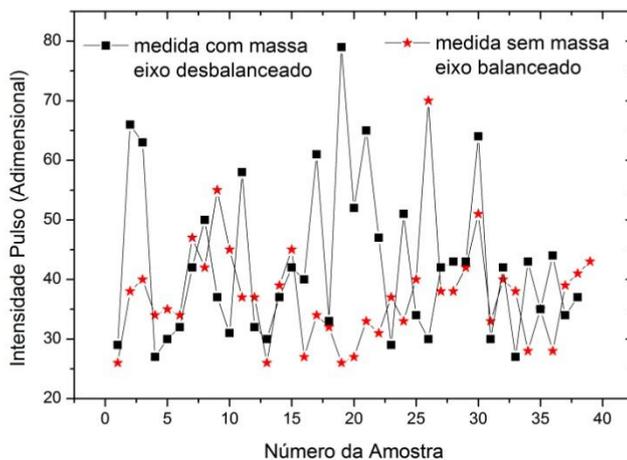


Figura 7. Gráficos comparativos de balanceamento de eixos ajuste menu 3.

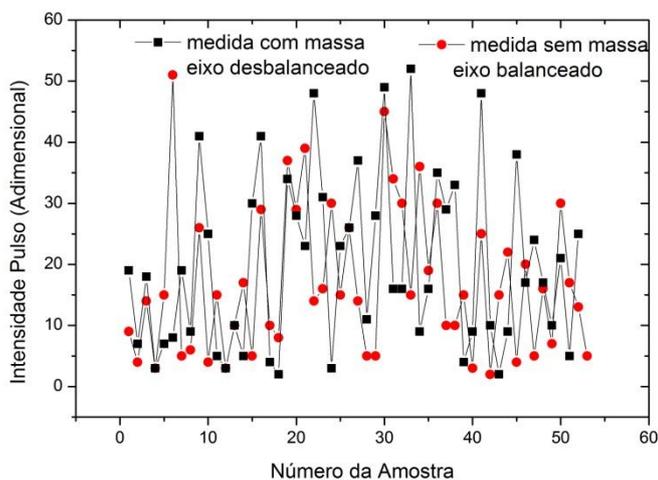


Figura 8. Gráficos comparativos de balanceamento de eixos ajuste menu 1.

Observa-se nos gráficos da Fig. 7 que quando aumentado a sensibilidade de captura dos sinais do sensor piezoelétrico, trocando o menu de ajuste, obtém-se para o eixo balanceado pequenos sinais fora do valor médio. Estes sinais indicam que conjunto mecânico sofreu uma influência de vibrações externas ao sistema em análise. A Fig. 8 mostra o comparativo entre os resultados encontrados para o maior ajuste de sensibilidade dado pelo menu 1 implementado no programa gerenciador. Com este ajuste é possível capturar pequenos sinais de vibração presentes quando o equipamento está em funcionamento. Entretanto, devem ser feitos tratamento específicos de sinais visando eliminar os eventuais ruídos produzidos durante as amostragens.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados iniciais deste trabalho são promissores sendo possível descrever o modelo matemático para o balanceamento de eixos e medir o nível de desbalanceamento dos mesmos em máquinas mecânicas protótipos. A calibração dos eixos foi conseguida acrescentando ou tirando pequenas massas testes acoplada ao flange (disco). Os testes indicaram que eixos com diferentes pesos e desbalanceados se comportaram de maneira igual quando comparados, sendo necessário apenas modificar a sensibilidade dos sensores piezoelétricos através de ajustes no programa gerenciador ou, manualmente, pelo usuário através do ajuste no potenciômetro existente na parte superior da caixa.

Os resultados obtidos indicam, ainda, que o protótipo respondeu melhor aos ajustes incorporados no menu 1 conforme ilustra a Fig. 6. Entretanto, verificou-se que os ajustes feitos nos demais menus respondem satisfatoriamente aos procedimentos experimentais escolhidos durante as amostragens e período de funcionamento do protótipo.

O protótipo é uma alternativa barata e eficaz para se calibrar eixos quando comparado com outros processos mais complexos existentes no mercado. Desse modo, para o futuro, pretende-se aumentar a confiabilidade do sistema e

simplificar o uso do equipamento para permitir que qualquer pessoa possa manuseá-lo além de desenvolver estratégias de uso adequado dos modelos matemáticos propostos neste sistema experimental.

## **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FAPERGS pelo suporte financeiro dessa pesquisa e a Unijui pela disponibilidade dos laboratórios.

## **6. REFERÊNCIAS**

- PEREIRA, J. C., 2005, Introdução à Dinâmica de Rotores, Apostila, Universidade Federal de Santa Catarina.
- RASIA, L. A. KARSBURG, M., 1999, Circuitos Integrados Programáveis e o Ambiente de Desenvolvimento, 32 p. Ed. Unijuí.
- RASIA, L. A. KARSBURG, M., 1999, Uso de Software no Projeto de Circuitos Impressos para Engenharia Eletrônica, 22 p. Ed. Unijuí.
- RASIA, L. A., et al., 2011, Electronic Card Design for Inclination Automatic Control Unit in Self Propelled Grain Harvesters, Proceeding of COBEM 2011, October, 24-28, Natal, RN.
- VALDIERO, A. C.; ANDRIGHETTO, P. L., 1999, Aplicações de robótica e automação na indústria metal-mecânica do Rio Grande do Sul. In.: IV JORNADA DE PESQUISA. Anais. Ijuí: UNIJUI, 207p, p.85.

## **7. RESPONSABILIDADE AUTORAL**

“O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho”.

## MICROCONTROLLED SYSTEM VIBRATION CONTROL OF MECHANICAL SHAFTS AGRICULTURAL MACHINES AND EQUIPMENT

Luiz Antonio Rasia, [rasia@unijui.edu.br](mailto:rasia@unijui.edu.br)<sup>2</sup>

Cristiano Osinski, [cristiano\\_osinski@hotmail.com](mailto:cristiano_osinski@hotmail.com)<sup>1</sup>

Antonio Carlos Valdiero, [valdiero@unijui.edu.br](mailto:valdiero@unijui.edu.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DCEEng-UNIJUI, Rua do Comercio, 3000, 98700.000- Ijuí-RS

<sup>2</sup>UNIJUI, Campus Panambi, Rua Prefeito Rudi Franke, N° 540, 98280000 – Panambi-RS

**Abstract.** *This work uses concepts, mathematical models and computer simulations to calibrate mechanical axes of agricultural machinery and equipment. Employs the concept of Kernel integrated into RISC microcontrollers that execute pre-defined Task monitoring vibrations through the axes of piezoelectric sensors, thermal sensors and rotation sensors specially arranged. The models are implemented in C language for specific microcontrollers cores used. The system analyzes the information obtained and conditions, triggering a circuit drive power that identifies the set points of on the axles weights. The adjustment data are stored on an SD card for later interpretation in specific software. The first results are being used to implement an integrated environment of worn out mechanical axes lab tests. The interface between the machine and the man is taken through a liquid crystal display. The first tests with the prototype showed that electronic shafts with different weights and unbalanced behaved equally compared, however it is only necessary to modify the sensitivity of piezoelectric vibration sensors through adjustments in manager program. The results were processed using Matlab.*

**Keywords:** *mechatronics, sensors and actuators, intelligent instrumentation, programmable integrated circuits*