

PROJETO CONCEITUAL DE UMA UNIDADE DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE INCLINAÇÃO PARA MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS

Antonio Carlos Valdiero, valdiero@unijui.edu.br¹
Luiz Antonio Rasia, rasia@unijui.edu.br¹
Douglas Ritter, ritter_douglas@yahoo.com.br¹
Djonatan Ritter, djo_ritter@hotmail.com¹
Nataniel Cavagnolli, nataniel-cavagnolli@bol.com.br¹

¹Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, DECEEng/UNIJUI/Câmpus Panambi/Caixa Postal 121/CEP 98290-000, Panambi-RS, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta o projeto conceitual de uma unidade de controle automático de inclinação para máquinas e equipamentos sujeitos a oscilações devido à movimentação em solo com relevo acidentado e/ou ondulado, ou ainda na superfície aquática de mares e represas. Muitos equipamentos agrícolas têm a perda de sua eficiência quando trabalham em terrenos inclinados, principalmente as colhedoras de grãos autopropelidas. O objetivo é pesquisar este problema, realizando a análise das necessidades e o projeto conceitual de uma unidade de controle automático de inclinação que seja adequada para manter módulos ou conjuntos de um equipamento com inclinação horizontal mesmo trabalhando em terreno com declive ou superfície inclinada ou sujeita a oscilações. Esta unidade de controle automático está sendo desenvolvida para aplicação em um kit modular para colheitadeiras autopropelidas convencionais, mas pode ser adequadamente aplicada em equipamentos móveis em variadas situações na terra, na água ou no ar. A metodologia de projeto utilizada é baseada na análise das necessidades de utilização do equipamento e no projeto conceitual de uma unidade modular. A unidade de controle automático de inclinação modular é composta por três principais componentes: mecanismo articulado, sistema de acionamento pneumático e sistema de controle. O projeto e o protótipo estão sendo desenvolvidos e testados numa bancada de simulação de inclinações disponível no Núcleo de Inovação em Máquinas Automáticas e Servo Sistemas (NIMASS) da UNIJUI com apoio financeiro da FAPERGS, FINEP, SEBRAE, CNPq e MCT, além das empresas parceiras.

Palavras-chave: controle automático de inclinação, sistemas de servoposicionamento, máquinas inteligentes

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o projeto conceitual de uma unidade de controle automático de inclinação para máquinas e equipamentos sujeitos a oscilações devido à movimentação em solo com relevo acidentado e/ou ondulado, ou ainda na superfície aquática de mares e represas. Atualmente, o uso de sistemas de controle eletrônico em máquinas vem aumentando graças à ampla difusão dos sistemas de satélite de posicionamento global (GPS) e ao avanço da informática e da eletrônica (Baldo e Magalhães, 2012).

Vários trabalhos recentes (Alvarenga *et al.*, 2013; Amaral *et al.*, 2010; Andrighetto *et al.*, 2008; Baldo e Magalhães, 2012; Bianchini *et al.*, 2013) descrevem alguns sistemas mecatrônicos que aumentam o desempenho de máquinas e equipamentos, apresentando os resultados de melhoria nos testes em bancadas experimentais. Bianchini *et al.* (2013) apresenta o desenvolvimento de uma bancada experimental que permite realizar ensaios para avaliação de desempenho com aquisição de dados em um penetrógrafo eletrônico automático. Alvarenga *et al.* (2013) descreve um sistema de controle automático constituído de um sensor de temperatura e umidade relativa, um microcontrolador, um servomotor e um pulverizador hidropneumático, o qual proporciona uma pulverização eficiente, considerando-se os parâmetros da aplicação de agrotóxicos, a minimização de perdas e a contaminação do meio ambiente. Baldo e Magalhães (2012) apresentam uma proposta para o controle automático de velocidade entre dois veículos que necessitam trafegar em paralelo durante operações agrícolas. Amaral *et al.* (2010) apresenta uma bancada experimental para teste de um regulador automático de vazão que é avaliado como um equipamento apropriado para a operação de redes de canais. Andrighetto *et al.* (2008) apresenta os resultados dos testes de um sistema mecatrônico de posicionamento pneumático desenvolvido para o controle automático da abertura da gaveta dos registros de descarga para a automação de instalações agroindustriais.

Nem sempre estes equipamentos operam sobre uma superfície plana, como é o caso de diversos equipamentos da área móbil que se deslocam em superfícies inclinadas no solo ou sujeitas a oscilações angulares na superfície da água ou

no ar. Muitos equipamentos agrícolas têm a perda de sua eficiência quando trabalham em terrenos inclinados (Gialamas *et al.*, 2006; Leite *et al.*, 2011; Lima *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2012), principalmente as colhedoras de grãos autopropelidas (Valdiero *et al.*, 2010). Pereira *et al.* (2012) avaliou a eficiência da subsolagem por meio da medição das profundidades atingidas em diferentes classes de declividades do solo. Gialamas *et al.* (2006) construiu uma bancada experimental com acionamento hidráulico para estimativa de estabilidade de tratores, simulando terrenos inclinados através da elevação de rodas do trator. Lima *et al.* (2004) estimou a declividade do terreno que permite o tráfego com as estabilidades longitudinal e transversal nas condições dinâmicas de tráfego de equipamentos florestais, com base na estabilidade estática e nas coordenadas do centro de gravidade. Leite *et al.* (2011) avaliou o desempenho operacional de quatro tratores agrícolas com tração dianteira auxiliar, em função de seis inclinações laterais em uma pista lateral de ensaios.

O objetivo deste trabalho é pesquisar este problema, realizando a análise das necessidades (seção 2) e o projeto conceitual (seção 3) de uma unidade de controle automático de inclinação que seja adequada para manter módulos ou conjuntos de um equipamento com inclinação horizontal mesmo trabalhando em terreno com declive ou superfície inclinada ou sujeita a oscilações. Esta unidade de controle automático está sendo desenvolvida para aplicação em um kit modular para colheitadeiras autopropelidas convencionais, mas pode ser adequadamente aplicada em equipamentos móveis em variadas situações na terra, na água ou no ar. A unidade de controle automático de inclinação será futuramente testada numa bancada de simulação de inclinações apresentada na seção 4. Por fim, as conclusões e perspectivas futuras são discutidas na seção 5.

2. ANÁLISE DAS NECESSIDADES DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE INCLINAÇÃO

A análise das necessidades de controle automático de inclinação foi realizada no domínio de máquinas e equipamentos para agricultura, onde existe uma perda de eficiência durante o trabalho em terrenos inclinados, principalmente na mecanização da colheita de grãos.

SCHLOSSER *et al.* (2004) estudou os índices de mecanização em propriedades produtoras de arroz no Rio Grande do Sul e mostrou os maiores valores deste índice nas propriedades de menor tamanho. Entretanto as menores propriedades agrícolas nem sempre dispõem de recursos para adquirir as últimas tecnologias em mecanização agrícola. Nestes termos, o incentivo ao incremento de produção de novos produtos, processos ou serviços tecnológicos em empresas que atendem a atividade agrícola é um elemento estratégico para o país, como é o caso das que compõem o Arranjo Produtivo Metal-Mecânico de cidade pólo em Panambi/RS. Os equipamentos convencionais de colheita, que são hoje amplamente utilizados no Brasil, apresentam uma tecnologia relacionada à separação e limpeza de grãos que ainda gera perdas e baixa qualidade de limpeza dos grãos, quando em terrenos inclinados. Em nível mundial, apenas alguns modelos de colheitadeira possuem um sistema que minimiza estas perdas em terrenos inclinados. Porém a aquisição deste tipo de equipamento tem um alto custo para o produtor brasileiro. Assim, o módulo de controle automático deve atender às necessidades de baixo custo, fácil adaptação nas máquinas e equipamentos disponíveis comercialmente e permitir o nivelamento automático da máquina ou equipamento modular mesmo em superfícies de apoio inclinadas.

Atualmente o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos é o caminho que pode levar a minimização de custos, aumento na produtividade e sobrevivência de empresas em um cenário competitivo globalizado. Inicialmente, tem-se uma breve descrição do estado da arte para o caso de colheitadeiras de grãos com e sem um sistema de nivelamento automático do conjunto de limpeza e separação de grãos mostrado na Fig. 1 e cujas características comparativas são apresentadas na Tab. 1. As colheitadeiras de grãos com sistemas automáticos de nivelamento são máquinas modernas com custo muito alto de aquisição e de manutenção devido à importação de tecnologia. Como exemplo destes equipamentos, tem-se a ceifeira-debulhadora 9780i CTS da John Deere, veja Fig. 1-(a), e as colheitadeiras New Holland Série TC, veja Fig. 1-(b).



Figura 1. Ceifeira-debulhadora 9780i CTS da John Deere (a), Colheitadeira New Holland Série TC (b) e Colheitadeira Massey MF 32 (c).

Tabela 1 - Breve síntese do estado da arte de colheitadeiras de grãos e suas características.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS	John Deere 9780i CLS	New Holland Tc5090	Massey MF 32
Largura do corte	7,6 m	20/25 pés	16/ 18/ 20 pés
Capacidade graneleiro	10.000 litros	7.200 litros	5.500 litros
Potência do motor	335 HP	240 CV	200 CV
Nivelamento automático	Sim, toda a máquina	Sim, o sistema de peneiras	Não

A maior preocupação da colheita mecanizada são as perdas, as quais podem ser minimizadas através de uma adequada regulação automática da altura de corte, do nivelamento da plataforma de corte e do autonivelamento dos sistemas de separação e limpeza de grãos. Uma alternativa para o problema de alto custo das colheitadeiras mais modernas é o desenvolvimento de uma unidade de controle automático de nivelamento para colheitadeiras de menor preço, tais como a Massey MF 32, veja Fig. 1-(c). A colheitadeira escolhida para base é do tipo similar a uma colheitadeira Massey Ferguson MF 32 (Fig. 2).



Figura 2 - Colheitadeira Massey Ferguson MF 32

A partir dos resultados da pesquisa e análise das necessidades de uma unidade de controle automático de inclinações, inicialmente voltada para o nivelamento do sistema de separação e limpeza de grãos em colheitadeiras, propõe-se o projeto conceitual descrito na seção seguinte.

3. CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE NIVELAMENTO

A concepção proposta para o sistema de controle automático de nivelamento compõe-se de três principais componentes: mecanismo, acionamento e controlador. O mecanismo é um sistema de barras articuladas que realizam a tarefa de nivelar o equipamento (que no caso do exemplo deste trabalho é o sistema de separação palha-grãos da colheitadeira). O acionamento pode ser hidráulico, pneumático ou elétrico. A concepção com acionamento hidráulico compõe-se de um cilindro de dupla ação e haste simples e uma válvula direcional de 5 vias e 3 posições do tipo ON-OFF. As concepções com acionamento pneumático e elétrico podem ser modeladas e otimizadas, implementadas no protótipo de laboratório e a concepção pneumática, por ser inédita, está sendo requerida como pedido de patente e não é apresentada neste trabalho. O controlador inicialmente é implementado utilizando-se uma placa eletrônica dSPACE, importada para tal finalidade. Após sua validação, o controlador é implementado numa placa eletrônica especialmente projetada para o adequado funcionamento do sistema.

A Figura 3 mostra um desenho esquemático da concepção escolhida para o sistema de controle automático de nivelamento. Tal concepção está sendo implementada numa bancada experimental de simulação de inclinações para testes de controle automático de nivelamento do protótipo de um conjunto de separação e limpeza de grãos composto por peneiras com movimento alternativo tal qual usado em colheitadeiras em campo. Esta bancada é apresentada na seção seguinte.

Prevê-se a aplicação da modelagem matemática de atuadores utilizados no acionamento do mecanismo da unidade de controle automático, com o objetivo de possibilitar o nivelamento automático do sistema de separação quando a máquina colheitadeira estiver trabalhando em terrenos com inclinação transversal. A concepção deste módulo do kit colheitadeira prevê três opções: atuador hidráulico, atuador pneumático e atuador elétrico com moto-reductor. A modelagem e simulação computacional permite a análise da influência dos parâmetros do atuador no desempenho do funcionamento do equipamento.

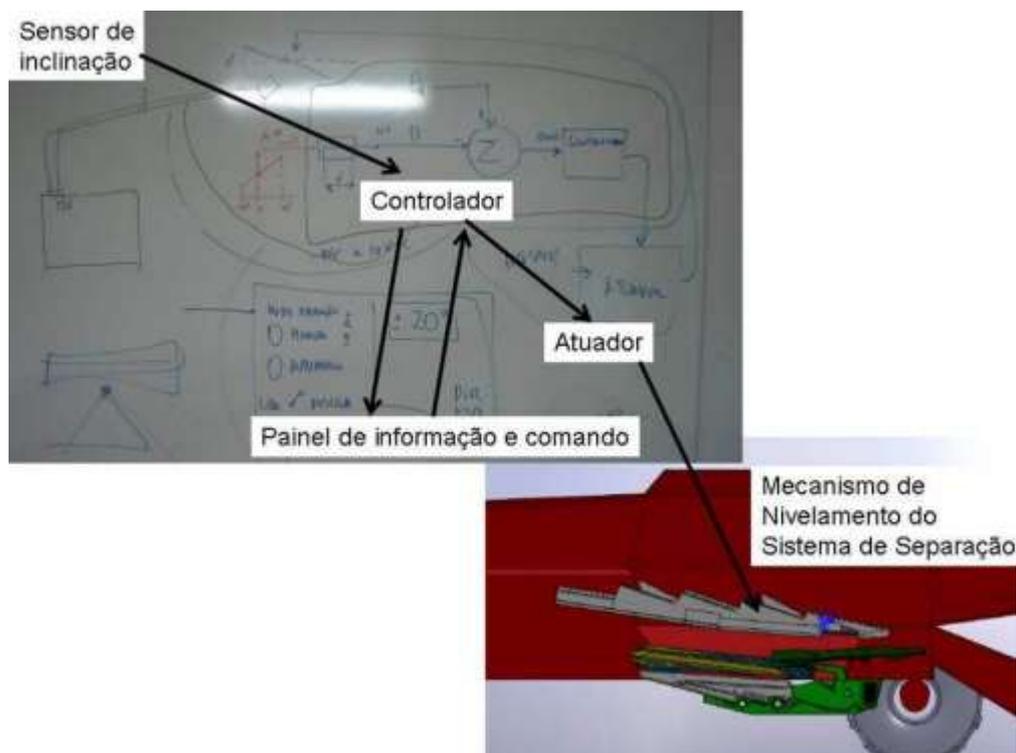


Figura 3 – Concepção do sistema de controle automático do nivelamento para aplicação no módulo de separação de cereais de colheitadeiras.

O foco da modelagem e das simulações computacionais é a concepção com atuadores adequada de atuadores. Os atuadores pneumáticos têm como vantagens a boa relação força/tamanho e a flexibilidade de instalação quando comparados com os atuadores elétricos, e são de baixo custo e limpos quando comparados com os atuadores hidráulicos. Entretanto, os atuadores pneumáticos possuem dificuldades de controle devido a diversas características não lineares do sistema, tais como a compressibilidade do ar, o comportamento não linear da vazão mássica nos orifícios da válvula e sua zona morta, além do atrito nas vedações do cilindro. Uma estratégia de compensação destas características e da minimização de seus efeitos danosos no funcionamento do sistema mecânico é por meio da modelagem matemática e sua utilização no controle ótimo. A modelagem matemática de sistemas dinâmicos é importante no projeto de máquinas inteligentes, pois é utilizada para fins de simulação, de projeto de controladores ótimos e no estudo do comportamento das variáveis de estado do sistema. Nesta modelagem, obtém-se geralmente um modelo não linear obtido por meio do acoplamento dinâmico (veja Fig. 4) entre o modelo do atuador e o modelo do mecanismo utilizado para o nivelamento do sistema.



Figura 4 – Diagrama esquemático representando o acoplamento dinâmico entre os modelos do atuador e do mecanismo.

A estratégia de controle automático de nivelamento é implementada em placa eletrônica com microcontrolador concebido conforme a Fig. 5.

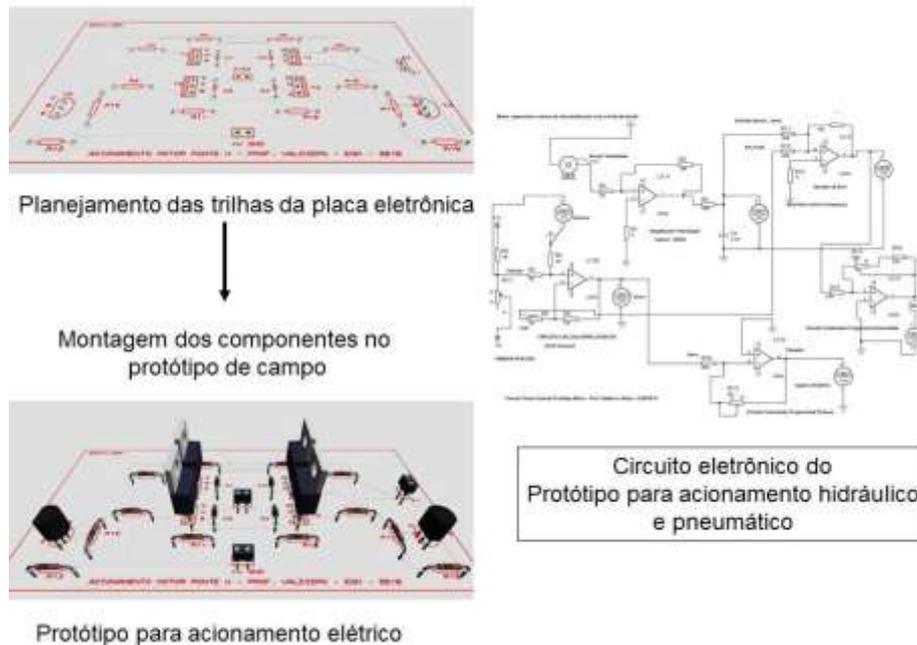


Figura 5 – Concepção da placa eletrônica para implementação do sistema de controle automático de nivelamento.

4. BANCADA PARA TESTES DO SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE NIVELAMENTO

Para desenvolvimento e aperfeiçoamento da concepção da unidade de controle automático de nivelamento, foi construído um protótipo de bancada de simulação de desníveis transversais. O principal objetivo deste protótipo é testar a validade da ideia e também servir para demonstrações de desempenho. A bancada permite a validação dos três tipos de acionamentos (hidráulico, pneumático e elétrico), com a adaptação de um encoder incremental, de um sistema de aquisição de dados e processamento por computador, conforme mostrado na Fig. 6.



Figura 6 – Instrumentalização do protótipo concebido para a unidade de controle de nivelamento em avaliação em no laboratório.

A Figura 7 mostra as fotografias da bancada de simulação de aclives em laboratório para futuro teste da unidade de controle automático de nivelamento do conjunto de separação e limpeza de grãos de colheitadeiras.



Figura 7 – Fotografia mostrando a bancada construída para os testes do protótipo da unidade de controle automático de nivelamento por diferentes acionamentos (hidráulico, pneumático e elétrico) e posterior avaliação em laboratório.

A simulação de aclives de terrenos é importante e tem como principal justificativa a prevenção em laboratório das condições de funcionamento do controle automático de nivelamento de colheitadeiras em campo e para o desenvolvimento e testes de inovações para sua adequada compensação. A Figura 8 mostra um desenho esquemático da bancada de simulação de aclives em laboratório e a representação do diagrama de corpo livre utilizado na modelagem matemática.

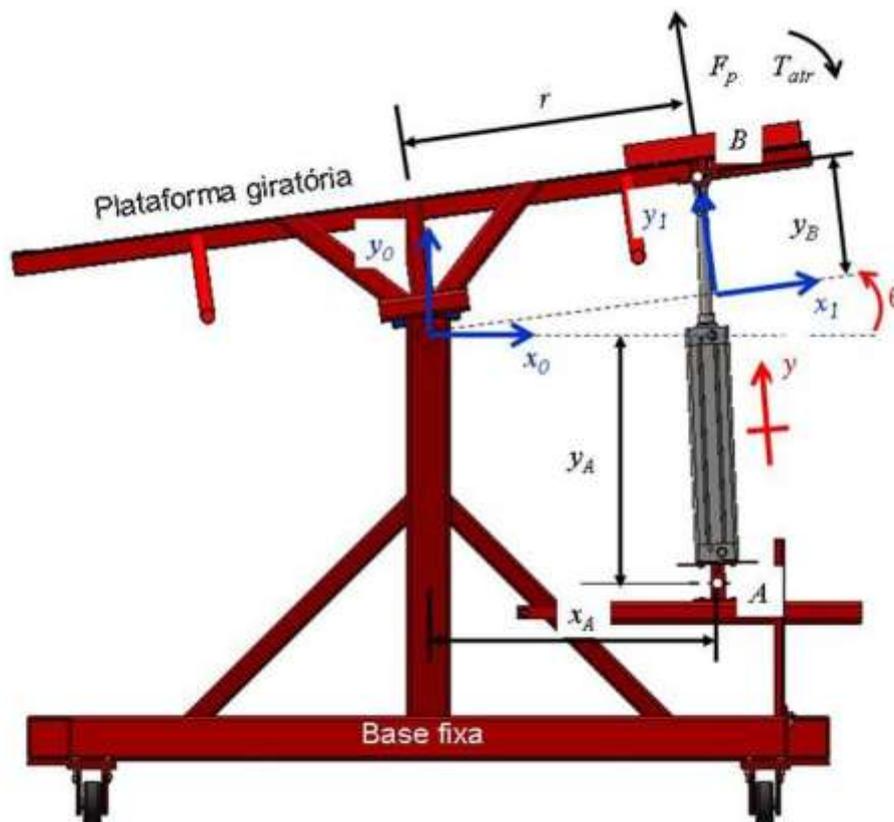


Figura 8 – Desenho esquemático da bancada para simulação de aclives e testes do protótipo do controle automático de nivelamento por diferentes acionamentos (hidráulico, pneumático e elétrico).

A modelagem matemática da bancada de simulação de aclives contribuiu para a previsão das grandezas físicas presentes nos movimentos e para o adequado projeto e especificação dos atuadores utilizados tanto no acionamento pneumático quanto no hidráulico.

A Figura 9 mostra uma fotografia do pré-teste em laboratório realizado com a estratégia de controle automático de nivelamento com a utilização de atuador pneumático, com destaque para a observação do conjunto de peneiras niveladas horizontalmente, o que permite o adequado funcionamento do sistema de separação palha-grão-partículas. O

controle automático de nivelamento com atuador pneumático mostrou-se eficiente, mais barato e é inédito, sendo o objeto de pedido de patente PI (Pedido de Invenção).



Figura 9 – Fotografia mostrando os testes do protótipo do controle automático de nivelamento por acionamento pneumático em avaliação no laboratório com a bancada com acionamento hidráulico.

A bancada de simulação de aclives acionada hidráulicamente mostrou-se mais eficiente e menos oscilatória para execução dos testes experimentais no laboratório. A Figura 10 mostra um gráfico comparativo do comportamento da bancada de simulação de aclives com acionamento pneumático e com acionamento hidráulico. Como já era previsto nas simulações computacionais, o uso do atuador pneumático para acionamento da bancada mostrou-se muito oscilatório e este comportamento foi comprovado na prática.

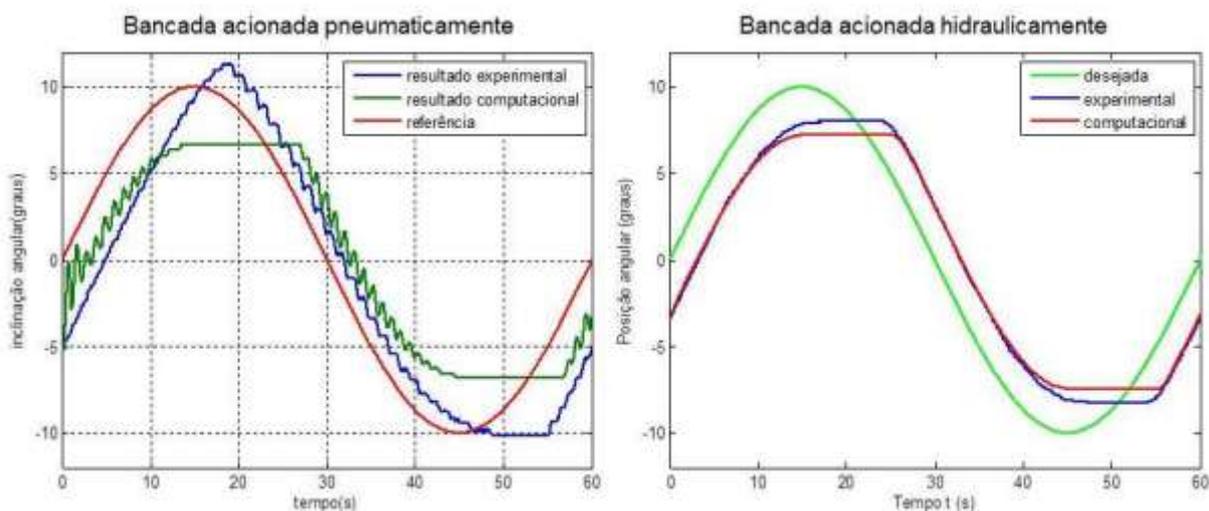


Figura 10 – Gráfico comparativo do comportamento (resultados de simulações computacionais e de testes experimentais) da bancada com acionamento pneumático e hidráulico.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apresentou-se a análise das necessidades e o projeto conceitual de uma unidade de controle automático de inclinação que seja adequada para manter módulos ou conjuntos de um equipamento com inclinação horizontal mesmo trabalhando em terreno com declive ou superfície inclinada ou sujeita a oscilações. A concepção foi apresentada para o estudo de caso do nivelamento automático do sistema de separação e limpeza de grãos presente no interior de máquinas autopropelidas para colheita de cereais, mas pode ser adaptada para uma diversidade de equipamento sujeitos a oscilações e/ou inclinações em superfícies da terra, da água ou no ar. Um protótipo de bancada experimental foi

construído para simulação de aclives para testes de validação da unidade de controle automático de nivelamento. Os resultados ilustram a concepção desenvolvida. Resultados quantitativos e qualitativos do desempenho da unidade de controle estão em fase final de geração e serão apresentados em trabalhos futuros. Pretende-se assim contribuir para o desenvolvimento de soluções mecatrônicas para problemas do trabalho em superfícies inclinadas, prevendo melhorias de desempenho funcional, ambiental e de segurança.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil. Os autores são agradecidos também à Fundação de Amparo a Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelas bolsas de iniciação científica e desenvolvimento tecnológico, à UNIJUÍ pela infraestrutura do Núcleo de Inovação em Máquina Automáticas e Servo Sistemas (NIMASS), implantado com recursos provenientes da FAPERGS, do SEBRAE e do FINEP/SEBRAE/MCT, num convênio de interação Universidades-Empresas do Arranjo Produtivo Local Metal-Mecânica, e modernizado recentemente com o apoio financeiro da CELPE (Companhia Energética de Pernambuco) por meio de um projeto no âmbito do Programa de P&D da ANEEL.

7. REFERÊNCIAS

- Alvarenga, C. B. de et al., 2013, “Controle automático do espectro de gotas de pulverizador hidropneumático em função do déficit de pressão de vapor d’água no ar”, *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Vol.43, n.1, pp. 26-33.
- Amaral, L. G. H. do et al., 2010, “Desempenho de um regulador automático de vazão para canais de irrigação”, *Engenharia Agrícola*, Vol.30, n.6, pp. 1165-1177.
- Andrighetto, P. L., Valdiero, A. C., Souza, M. de, 2008, “Controle automático de registros de descarga com acionamento pneumático em unidades de armazenagem agrícola”, *Ciência Rural*, Vol.38, n.9, pp. 2626-2629.
- Baldo, R. F. G., Magalhaes, P. S. G., 2012, “Sistema de controle de velocidade sincronizada entre dois veículos agrícolas”, *Ciência Rural*, Vol.42, n.2, pp. 298-304.
- Bianchini, A., Roque, M.W., Rosa, R.P., 2013, “Development of an automated bench top electronic penetrometer”, *Engenharia Agrícola*, Vol.33, n.6, pp. 1191-1199.
- Gialamas, T. A., Bochtis, D., Ampatzidis, Y., Kateris, D., Gemtos, T. A., Tsatsarelis, C. A., 2006, “Tractor stability estimation using adjusting testing-bench”, *Proceedings of the International Conference Haicta, Volos*, pp. 179-186.
- Leite, F., Santos, J.E. G. dos, Lancas, K. P., Leite Junior, J. B., 2011, “Evaluation of tractive performance of four agricultural tractors in laterally inclined terrain”, *Engenharia Agrícola*, Vol.31, n.5, pp. 923-929.
- Lima, J. S. de S. et al., 2004, “Estimativa das estabilidades longitudinal e transversal de tratores florestais utilizados na colheita de madeira”, *Revista Árvore*, Vol.28, n.6, pp. 839-844.
- Pereira, D. P. et al., 2012, “Eficiência da subsolagem na profundidade de preparo do solo em função da declividade do terreno”, *CERNE*, Vol.18, n.4, pp. 607-612.
- Schlosser, J. F., Machado, O. D. da C., Debiasi, H., Pinheiro, E. D., 2004, “Índice de mecanização de propriedades orizícolas no Rio Grande do Sul”, *Ciência Rural*, Vol. 34, n. 3, pp. 791-794.
- Valdiero, A. C., Bortolaia, L. A., Rasia, L. A., Hartmann, R.A., Tomazoni, M.A., 2010, “Análise da necessidade de inovação de um kit modular para colheitadeiras autopropelidas”, *Anais do IX Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola/ XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Vitória, Brasil.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CONCEPTUAL DESIGN OF AN INCLINATION AUTOMATIC CONTROL UNIT FOR EQUIPMENTS AND MACHINES

Antonio Carlos Valdiero, valdiero@unijui.edu.br¹
Luiz Antonio Rasia, rasia@unijui.edu.br¹
Douglas Ritter, ritter_douglas@yahoo.com.br¹
Djonatan Ritter, djo_ritter@hotmail.com¹
Nataniel Cavagnolli, nataniel-cavagnolli@bol.com.br¹

¹Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, DECEEng/UNIJUI/Câmpus Panambi/Caixa Postal 121/CEP 98290-000, Panambi-RS, Brasil

Abstract. *This work presents the conceptual design of an inclination automatic control unit for machines and equipments subject to oscillations due to the movement in soil with undulated relief, or yet in aquatic surface of seas and reservoirs. Many farm equipments have the loss of their efficiency when they work on sloped soil, mainly self-propelled grains harvesters. The aim of this paper is to research the need analysis and the conceptual design of an inclination automatic control unit that must be adequate for to maintain the equipment modules with horizontal inclination same working in sloped soil. This automatic control unit is been developed for application in a modular kit for conventional self-propelled harvesters, but can be applied properly on mobiles devices in varied situations on land, water or air. The employed design methodology is based on the equipment needs analysis and the modular unit conceptual design. The modular inclination automatic control unit is composed by three main components: articulated mechanism, driven system e control system. The prototype and design are been developed at the in NIMASS/UNIJUI with financial support by FAPERGS, FINEP, SEBRAE, CNPq and MCT, above partner companies.*

Keywords: *inclination automatic control, servoposition systems, smart machines*