

RICARDO FERREIRA GARCIA

**SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO
DE UMA COLHEDORA DE FEIJÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título *Doctor Scientiae*

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2002

RICARDO FERREIRA GARCIA

**SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO
DE UMA COLHEDORA DE FEIJÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título *Doctor Scientiae*

APROVADA: 20 de maio de 2002

Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto

Dr. Evandro Chartuni Mantovani

Prof. Haroldo Carlos Fernandes
(Conselheiro)

Prof. Olímpio Hiroshi Miyagaki
(Conselheiro)

Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

Ao Criador.

À minha mãe, Maria de Lourdes Ferreira Garcia.

Ao meu pai, Rasmô Garcia.

Ao meu irmão, Guilherme Ferreira Garcia.

Às minhas irmãs, Cristina Ferreira Garcia e Juliana Ferreira Garcia.

À minha esposa, Carla Maria Castro de Sousa Garcia.

Ao meu filho, Pedro Sousa Garcia.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso e pelos ensinamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida e pelo auxílio à pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Programa Redes Cooperativas de Pesquisa (RECOPE/FINEP), pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

Às Indústrias Reunidas Colombo, pelo suporte financeiro.

À EMBRAPA Milho e Sorgo, em especial ao Dr. Evandro Chartuni Mantovani e João Batista Guimarães Sobrinho, e à EPAMIG de Sete Lagoas, em especial ao Sr. Pedro de Alcântara Rocha, pelo suporte experimental e de recursos humanos.

Ao professor Daniel Marçal de Queiroz, pela orientação na realização do presente trabalho.

Aos professores Haroldo Carlos Fernandes e Olímpio Hiroshi Miyagaki, pelo apoio, pelas críticas e sugestões no decorrer do trabalho.

Aos colegas de curso, Anderson Chagas, Cristiano Souza e Roberto Carlos, pela ajuda no experimento de campo, e aos demais colegas, pelas contribuições, pela amizade e pelo bom convívio.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial aos secretários Marcos e Edna e aos cruzeirenses Galinari e Juvercino.

Aos meus pais e irmãos, à minha esposa Carla e seus pais, pelo estímulo, pela compreensão e pela amizade nos momentos de dificuldade.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para que esta pesquisa fosse realizada.

BIOGRAFIA

RICARDO FERREIRA GARCIA, filho de Rasmão Garcia e Maria de Lourdes Ferreira Garcia, nasceu no dia dois de agosto de 1971, em Viçosa, Minas Gerais.

Realizou os estudos de primeiro e segundo graus em Viçosa e os estudos universitários na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. Em dezembro de 1995, concluiu o curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, onde foi monitor da disciplina Mecânica Aplicada.

Em março de 1996, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo tese em fevereiro de 1998.

Em março de 1998, iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo tese em maio de 2002.

Durante o último ano de curso de Doutorado, foi Professor Substituto na área de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

ÍNDICE

RESUMO	viii
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	5
DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS	7
RESUMO	7
DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC DATA ACQUISITION COMPUTER PROGRAM FOR EVALUATION OF AGRICULTURAL MACHINES	7
ABSTRACT	7
INTRODUÇÃO	8
MATERIAL E MÉTODOS	10
RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
CONCLUSÕES	23
AGRADECIMENTOS	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM CONJUNTO TRATOR-COLHEDORA DE FEIJÃO	26
RESUMO	26
EVALUATING THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF A TRACTOR-HARVESTER SYSTEM FOR BEANS	27
ABSTRACT	27

INTRODUÇÃO	27
MATERIAL E MÉTODOS	30
RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
CONCLUSÕES	48
AGRADECIMENTOS	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM CONJUNTO TRATOR-COLHEDORA DE FEIJÃO	51
RESUMO	51
SIMULATING THE DYNAMIC PERFORMANCE OF A TRACTOR-HARVESTER SYSTEM FOR BEANS	52
ABSTRACT	52
INTRODUÇÃO	52
MATERIAL E MÉTODOS	54
RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
CONCLUSÕES	80
AGRADECIMENTOS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
CONCLUSÕES GERAIS	83

RESUMO

GARCIA, Ricardo Ferreira, D.S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2002.
Simulação do comportamento dinâmico de uma colhedora de feijão.
Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Conselheiros: Haroldo Carlos Fernandes e Olímpio Hiroshi Miyagaki.

Com o objetivo de realizar a simulação do comportamento dinâmico de uma colhedora de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), foi implementado um sistema de aquisição automática de dados, avaliado o desempenho operacional de um conjunto trator-colhedora de feijão e desenvolvido e validado um modelo de simulação de sistemas mecânicos para análise do comportamento dinâmico deste conjunto. Parte do trabalho foi realizada no Laboratório de Mecanização Agrícola e no Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial do Departamento de Engenharia Agrícola, da UFV. Esta etapa constou de instalação e configuração de sensores e de equipamentos de aquisição automática de dados. A avaliação de desempenho do conjunto trator-colhedora de feijão foi realizada na Área Experimental da Epamig e no Laboratório de Automação Agropecuária da Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas, MG. Os ensaios foram realizados com a cultura de feijão cultivar Pérola, utilizando-se um trator Massey Ferguson modelo MF 620 4x2 com tração dianteira auxiliar e uma colhedora de arrasto Colombo modelo Double Master. O conjunto trator-colhedora de feijão foi ensaiado sob diferentes condições de operação, ou seja, velocidade de deslocamento de 4, 7 e 10 km/h, número de linhas de feijão na leira colhida de 4, 7 e 10 linhas e rotação da tomada de potência (TDP) de 420 e 540 rpm. O sistema de aquisição automática de dados foi implementado, utilizando-se o programa de computador LabVIEW versão 6i e equipamentos da National Instruments. Foi desenvolvido um aplicativo para os sensores

célula de carga, torquímetro, medidor de rotação tipo sensor indutivo e medidor de velocidade tipo radar, permitindo a coleta e armazenamento de dados, em tempo real, de força de tração requerida pela barra de tração, torque requerido e rotação da TDP, e velocidade de deslocamento da máquina colhedora de feijão, respectivamente. Na avaliação do desempenho operacional do conjunto trator-colhedora de feijão, foram determinadas as características operacionais, dinâmicas e de manejo que representavam o comportamento do conjunto trator-colhedora de feijão durante a operação de colheita. A capacidade de processamento do conjunto foi determinada, medindo-se a produção da máquina por unidade de tempo, não considerando os tempos perdidos. A avaliação de perdas foi feita através de amostragens durante os ensaios, em que se recolheu o material perdido nos setores de recolhimento, trilha e separação, e limpeza da máquina, além das perdas no arranquio e enleiramento e as perdas naturais da área de ensaio. Para o desenvolvimento do modelo utilizado na simulação do comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão, utilizou-se o programa de computador ADAMS versão 10.0. Este modelo incluiu a simulação do trator, interação entre solo e pneu, simulação do sistema de transmissão de potência e dos sistemas de trilha e limpeza da colhedora de feijão. Foram modelados o trator, composto por oito corpos rígidos, e a colhedora de feijão composta por quatro corpos rígidos. A taxa de alimentação de feijão colhida pela colhedora de feijão foi calculada, em função do número de linhas enleiradas, distância entre as fileiras, velocidade longitudinal do sistema, produtividade do feijão e relação, em massa, de palha e grão da cultura. O peso do produto no tanque graneleiro foi obtido, integrando-se a taxa de alimentação do produto da máquina em função do tempo. No trabalho realizado, implementou-se um sistema de aquisição automática de dados e desenvolveu-se o aplicativo AvaliaMA para avaliação de máquinas agrícolas buscando a coleta de dados de uma forma eficiente e eliminando os erros tradicionais gerados pela coleta de dados convencional, como anotações incorretas em planilhas e perda de dados. Observou-se, durante ensaios, facilidade de operação do sistema, permitindo rapidez na operação de aquisição de dados, e a capacidade de combinar o sistema implementado para atender a demandas de diversas pesquisas, podendo ser utilizado em diferentes tipos de máquinas agrícolas. Na avaliação do desempenho operacional do conjunto trator-colhedora de feijão, foi utilizado o sistema de aquisição automática de dados implementado. O maior valor de torque requerido na TDP, observado durante os ensaios de campo para a rotação de 420 rpm na TDP, foi de 730,84 mN, resultando numa potência requerida na TDP de 26,79 kW, enquanto para a condição de 540 rpm foi de 907,21 mN, resultando numa potência requerida na TDP de

47,96 kW. O conjunto apresentou, durante os ensaios de campo, capacidade de processamento de 3,06 t/h, para uma área com produtividade média de 2186,63 kg/ha. Os valores de perdas para os sistemas da plataforma de recolhimento, trilha e separação, e limpeza encontrados foram de 114,93, 72,11, e 9,11 kg/ha, respectivamente, totalizando cerca de 11,15 % de perdas. Um modelo matemático para simular o comportamento dinâmico do trator foi desenvolvido e utilizado para simular seu raio de giro observando-se, na comparação dos valores simulados com os dados experimentais, um erro máximo de 1,82%. Um outro modelo matemático para simular o comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão foi também desenvolvido e utilizado, sob três diferentes condições. Comparando-se os dados obtidos sob testes experimentais desenvolvidos em condições de campo com os valores obtidos na simulação, observou-se, na primeira condição de simulação, erro relativo médio de 17,08%, 13,61%, 5,91%, 35,89% e 25,99% para a velocidade de deslocamento, taxa de alimentação, rotação da TDP, torque e potência requeridos na TDP, respectivamente. Na segunda condição de simulação, observou-se erro relativo médio de 16,91%, 5,76%, 28,88% e 27,68% para a velocidade de deslocamento, rotação da TDP, torque e potência requeridos na TDP, respectivamente. Na terceira condição de simulação, observou-se erro relativo médio de 17,16%, 36,93%, 5,99%, 36,52% e 34,55% para a velocidade de deslocamento, taxa de alimentação, rotação da TDP, torque e potência requeridos na TDP, respectivamente.

ABSTRACT

GARCIA, Ricardo Ferreira, D.S., Universidade Federal de Viçosa, May of 2002.
Simulation of the dynamic performance of a beans harvester. Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Committee Members: Haroldo Carlos Fernandes and Olímpio Hiroshi Miyagaki.

With the objective of simulating the dynamic performance of a beans (*Phaseolus vulgaris* L.) harvester, a data automatic acquisition system was implemented, the operational performance of a tractor-harvester system for beans was evaluated, and a simulation model for dynamic performance of the tractor-harvester system for beans was developed and evaluated. Part of the work was done in the Agricultural Mechanization and in the Machines Project and Artificial Vision Laboratories of the Department of Agricultural Engineering, Federal University of Viçosa. This stage consisted of the installation and configuration of sensors and data automatic acquisition system equipments. The performance evaluation of the tractor-harvester system for beans was done in the Experimental Area of Epamig and in the Embrapa Agricultural Automation Laboratory of Corn and Sorghum in Sete Lagoas, MG. For the field tests, a beans cultivar "Pérola" was harvested with a Massey Ferguson tractor, MF 620 model equipped with front-wheel auxiliary drive, and a Colombo Double Master beans harvester. The field tests were done in different operation conditions, varying travel speed (4, 7 and 10 km/h), number of beans lines picked (4, 7 and 10) and power takeoff (PTO) rotation (420 and 540 rpm). The data automatic acquisition system was implemented using the computer program LabVIEW 6i and National Instruments equipments. A Virtual Instrument was developed for load cell, torque meter, inductive sensor type rotation meter and radar type speedometer, allowing the acquisition and

storage of data, in real time, of traction force required by the traction bar, PTO torque and rotation required, and speed travel of the system, respectively. The operational, dynamics and handling characteristics, that represented the tractor-harvester system for beans performance, were evaluated during the harvest operation. The capacity of processing of the system was determined measuring the machine production by unit of time, without considering the lost time. The losses evaluation was made through samplings, during field tests, where the lost material was collected in the pickup reel platform, threshing and separation, and cleaning sections of the machine, besides the losses in the alignment operation and the natural losses of the field. For the development of the model, to simulate the dynamic performance of the tractor-harvester system for beans, the computer program ADAMS 10.0 was used. The model included tractor simulation, and a soil/tire interface, a power train and threshing and cleaning systems of the beans harvester. The tractor was modeled as composed by eight rigid bodies, and the bean harvester, by four rigid bodies. The total feeding rate was calculated in function of the number of lines, distance among the lines, travel speed of the system, field productivity and material other than grain and grain ratio. The weight of the product in the harvester tank was obtained integrating the feeding rate of the product in function of the time. A data automatic acquisition system was implemented and an AvaluMA Virtual Instrument was developed in order to evaluate agricultural machines. During field tests, the system showed capacity to supply results accurately acceptable and to be combined to assist specific test demands that could be used in different types of agricultural machines and in different climatic conditions. In the operational performance evaluation of the tractor-harvester system for beans, the data automatic acquisition system implemented was used. The largest PTO torque required value observed during the field tests for the 420 rpm rotational velocity was 730.84 mN, resulting in a PTO required power of 26.79 kW, and for the 540 rpm condition, it was 907.21 mN, resulting in a PTO required power of 47.96 kW. The group presented a processing field capacity of 3.06 t/h, for an area with productivity of 2,186.63 kg/ha. The loss values for the gathering, threshing and separation, and cleaning systems were 114.93, 72.11, and 9.11 kg/ha, respectively, resulting in 11.15% of loss. The simulation models of the tractor-harvester system for beans, of the interaction between soil and tire, of the power transmission system and of the threshing and cleaning systems of the harvester were developed. Finally, the dynamic performance analysis of the tractor-harvester system for beans was done. Comparing actual and simulated data, it was found, at the first simulation condition, average relative error of 17.08%, 13.61%,

5.91%, 35.89% and 25.99% for the velocity, feeding rate, PTO rotational velocity, PTO required torque and PTO required power, respectively. At the second simulation condition, it was found average relative error of 16.91%, 5.76%, 28.88% and 27.68% for the velocity, PTO rotational velocity, PTO required torque and PTO required power, respectively. At the third simulation condition, it was found average relative error of 17.16%, 36.93%, 5.99%, 36.52% and 34.55% for the velocity, feeding rate, PTO rotational velocity, PTO required torque and PTO required power, respectively.

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é considerado grande produtor de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) tanto em produção como em área cultivada, atingindo na safra 2001/2002, segundo previsões da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), 3,26 milhões de toneladas, com área plantada de 4,21 milhões de hectares (BRASIL, 2002).

O hábito de consumo de feijão pela família brasileira, tanto nas cidades como no meio rural, associado à grande adaptação climática da cultura, faz com que esta seja distribuída por todo o território nacional. O feijão é considerado uma das espécies de leguminosas mais importantes no País e representa a principal fonte de proteína das populações de baixa renda, sendo o mais utilizado em nossa dieta como substituto de proteínas animais, além de constituir um produto de destacada importância nutricional, econômica e social (ZIMMERMANN et al., 1988).

Durante o ciclo da cultura do feijão, são adotadas práticas que visam à obtenção de um produto final de alto valor comercial. A colheita, etapa final da cultura, se não for bem conduzida, poderá invalidar esforços e insumos aplicados nas fases anteriores, comprometendo a qualidade e a conservação dos grãos (CONTO et al., 1980). Segundo SRIVASTAVA et al. (1993), o objetivo da colheita de grãos é recolhê-los do campo e separá-los do resto do material colhido de maneira oportuna com o mínimo de perdas, mantendo sua alta qualidade. O retorno financeiro depende, além da qualidade final do produto, também da quantidade colhida. Daí a preocupação em realizar a colheita com o mínimo de perdas possíveis, evitando prejuízos. Dependendo do método empregado, as etapas de colheita podem ser realizadas manualmente, por diferentes máquinas ou podem ser combinadas em uma única máquina capaz de realizar todas as operações.

A colhedora de feijão que recolhe, trilha, separa e limpa os grãos de feijão é acionada e puxada por um trator. Existem algumas indústrias produzindo este tipo de máquina, no Brasil, onde é desenvolvida por tentativa e erro. A aplicação de programas de computador específicos que auxiliem na simulação de sistemas mecânicos, a fim de otimizar seu projeto, elimina a etapa de tentativa e erro na solução de problemas de engenharia. Sistemas com técnicas de projeto auxiliado por computador (CAD), aplicados ao projeto de máquinas, têm se tornado um dos métodos mais populares para reduzir o custo de produção e o tempo entre a idéia e o desenvolvimento do produto final (GARCIA, 1998).

A mecanização do processo de colheita do feijão implica em economia de tempo e energia, além de eliminar uma tarefa tediosa. Além disto, a colheita corresponde a cerca de 60 % dos custos de todo o ciclo produtivo (ROBLES et al., 1997).

Estudos sobre a otimização do processo de colheita e processamento de grãos, dentre estes os de feijão, têm sido realizados através do desenvolvimento e aperfeiçoamento de mecanismos e máquinas, melhorando seu desempenho operacional, tornando-os mais eficientes e seguros, e a qualidade dos grãos colhidos.

FERNANDES (1993) desenvolveu um protótipo trilhador de feijão, com funcionamento convencional, de baixo custo inicial e que demandou baixa potência, e avaliou seu desempenho com base na capacidade e eficiência de trilha, nas danificações mecânicas por ela provocadas e na qualidade das sementes trilhadas. Foram encontrados baixo índice de perdas e de danos mecânicos nas sementes, capacidade mínima de trilha de 149,21 kg/h, e potência máxima demandada para seu acionamento de 1,19 kW, quando operado na faixa de 14,9 a 17,9 m/s e com umidade dos grãos variando de 13 a 17% (b.u.).

O processo de arranquio e enleiramento das plantas requer excessiva mão-de-obra, sendo um problema de grande relevância para os produtores. No intuito de contornar essa situação, bem como de reduzir os custos de produção, NAGAOKA (1995) projetou e construiu protótipos de máquinas de arranquio e enleiramento com discos recortados e lâminas de corte acoplados ao engate de três pontos do trator. Concluiu-se que o equipamento desenvolvido, além de reduzir o custo da colheita do feijão, permitiu menor risco de perdas provocadas pelas chuvas, ganho de tempo, redução do problema de falta de mão-de-obra durante a colheita e, conseqüentemente, a expansão da cultura.

MOREIRA (1997), também trabalhando no intuito de eliminar a excessiva mão-de-obra dispensada no arranquio e enleiramento da cultura, desenvolveu um protótipo

de uma máquina para o arranquio e enleiramento do feijão, adaptável às condições irregulares dos solos, tendo como ferramentas de corte dois discos recortados. O protótipo proporcionou baixos índices de plantas não-cortadas/arrancadas, perdas por danos e potência demandada, atingindo, assim, os resultados esperados pelo autor.

Devido à necessidade de se conhecer o desempenho de máquinas destinadas à colheita (recolhimento) de feijão, aliada à importância da cultura para o Brasil, autores têm trabalhado avaliando seu desempenho.

SOUZA (2001 a) avaliou o desempenho de uma colhedora de feijão de arrasto, modelo Double Master, das Indústrias Reunidas Colombo, estudando as exigências energéticas, a capacidade de processamento, as perdas ocasionadas no processo de colheita, a qualidade do produto colhido e o nível de ruído emitido pelo conjunto trator-colhedora. Posteriormente, o autor implementou um modelo matemático de simulação da trilha e separação mecânica da colhedora, validando-o por meio da comparação entre resultados simulados com resultados obtidos experimentalmente.

SOUZA (2001 b), também trabalhando com colheita mecanizada do feijão, avaliou o desempenho de uma colhedora de feijão, da Indústria Nux Maquinagrícola, modelo RXT 350, na região da Zona da Mata de Minas Gerais, levando-se em consideração uma exploração mais segura e econômica das propriedades agrícolas. O autor observou, em testes de desempenho, a melhor capacidade de recolhimento de 2,77 t/h, inclinação-limite do terreno para tráfego com estabilidade transversal do conjunto trator-colhedora de 31% e níveis de ruído superiores ao limite diário estabelecido por normas.

A vantagem de se conhecer o desempenho operacional de uma máquina agrícola consiste em poder empregar uma seleção racional. Esta mecanização racional, segundo MIALHE (1974), consiste em empregar um sistema ou conjunto de máquinas de forma técnica e economicamente organizada, na execução das operações exigidas pela produção agrícola. O emprego da mecanização racional permite obter o máximo de rendimento útil com um mínimo de dispêndio de energia, tempo e dinheiro, permitindo a eleição dos critérios racionais de escolha e manejo de máquinas e implementos agrícolas que irão executar as operações agrícolas em estudo.

Atualmente, os agricultores trabalham diante de problemas como a elevação dos custos de produção e queda de preços no mercado. Como resultado, eles precisam de todas as vantagens com o objetivo de produzir safras de forma eficiente com baixos custos. Embora os agricultores não possam controlar todas as variáveis que influenciam os custos de produção, existem áreas que podem ser controladas e aperfeiçoadas. Uma

dessas áreas é a operação e manejo das máquinas agrícolas, tais como a seleção adequada do conjunto trator-máquina agrícola (GREEN et al., 1985).

É importante saber a capacidade de uma máquina para selecionar a potência e o equipamento que pode desempenhar as operações de campo em tempo. Mas, é também importante evitar custos adicionais de máquinas superdimensionadas (BOWERS, 1992).

A aquisição de dados para a avaliação operacional de uma máquina agrícola tem como objetivo apresentar ao observador os valores das variáveis, ou parâmetros, que estão sendo medidos. Geralmente, este valor numérico, ou medido, não é igual ao valor real da variável, ou seja, o sistema de aquisição tem como entrada o valor real da variável e sua saída é o valor medido.

Uma vez que a tomada de dados é uma das etapas mais tediosas de um ciclo de pesquisa, pode-se automatizar o sistema de aquisição sem comprometer a precisão, reduzindo os erros gerados pela transcrição de dados, eliminando as variações induzidas pelo operador nos processos de coleta de dados e aumentando a taxa de leitura de dados (JOHNSON, 1997).

Atualmente, a maioria dos cientistas e pesquisadores utiliza computadores pessoais (PC) com placas de expansão para aquisição de dados em pesquisas laboratoriais, controle industrial e em testes e medições. Na agricultura, vários pesquisadores têm trabalhado em diferentes áreas, utilizando algum tipo de sistema de aquisição de dados com a finalidade de monitorar eventos em suas pesquisas. A versatilidade de um sistema de aquisição também se torna importante, permitindo sua adaptação para diferentes pesquisas.

Diante disso, este trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos:

- desenvolver um programa de computador para aquisição automática de dados a ser utilizado na avaliação de máquinas agrícolas;
- avaliar o desempenho operacional de um conjunto trator-colhedora de feijão;
- e
- usar a técnica de simulação de sistemas mecânicos para desenvolver um modelo de simulação de um conjunto trator-colhedora de feijão e analisar seu comportamento dinâmico.

A introdução e o resumo deste trabalho seguem as normas prescritas para feitura de tese, na Universidade Federal de Viçosa, sendo os artigos escritos de acordo com as normas da Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, por recomendação do comitê de orientação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOWERS, W. **Machinery management**: how to select machinery to fit the real needs of the managers. 4 ed. Farm Business Management. Moline, IL: Deere & Company Service Publications, 1992. 206 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Companhia Nacional de Abastecimento. **Política Agrícola - SAFRA**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/politica_agricola/safra/avalia.html>. Acesso em : 15 janeiro 2002.
- CONTO, A. J., et al. **Aspectos técnicos e econômicos da colheita mecânica e manual do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1980. 14 p. (EMBRAPA-CNPAP. Circular Técnica, 02).
- FERNANDES, H. C. **Desenvolvimento e avaliação do desempenho de uma máquina trilhadora de feijão**. 1993. 51 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- GREEN, M. K.; STOUT, B. A.; SEARCY, S. W. Instrumentation package for monitoring tractor performance. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 2, p. 346. 1985.
- GARCIA, R. F. **Otimização do projeto de componentes de uma colhedora de forragem**. 1998. 78 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

- JOHNSON, G. W. **LabVIEW graphical programming: practical applications in instrumentation and control**. New York: McGraw-Hill, 1997. 665 p.
- MIALHE, L. G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Ed. Ceres, 1974. 301 p.
- MOREIRA, R. F. **Desenvolvimento de um cortador/enleirador de feijão e avaliação do efeito da velocidade de operação no seu desempenho**. 1997. 60 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- NAGAOKA, A. K. **Desenvolvimento de dois tipos de cortadores-arrancadores de feijão e avaliação de seus desempenhos em cultivar com crescimento tipo III**. 1995. 50 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ROBLES, C. J. F., et al. Diseño de una máquina cosechadora de fríjol. **Memoria del Congreso Nacional**. Asociación Mexicana de Ingeniería Agrícola, v. 7, p. 99. 1997.
- SOUZA, C. M. A. de. **Avaliação e simulação do desempenho de uma colhedora de fluxo axial para feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2001. 113 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SOUZA, L. H. de. **Avaliação do desempenho de uma recolhedora-trilhadora de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) na Zona da Mata de Minas Gerais**. 2001. 58 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P. **Engineering principles of agricultural machines**. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1993. 601 p.
- ZIMMERMANN, M. J. O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. 589 p.

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

RESUMO

A aquisição de dados é um dos principais problemas enfrentados por engenheiros e pesquisadores responsáveis pela realização de testes de máquinas agrícolas, fato este devido à alta complexidade dessas máquinas. Para estabelecer os parâmetros relacionados ao seu desempenho, uma série de variáveis precisam ser monitoradas. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um programa de computador para aquisição automática de dados a ser utilizado na avaliação de máquinas agrícolas. O sistema foi implementado utilizando-se o programa de computador LabVIEW versão 6i e equipamentos da "National Instruments". Foram desenvolvidos Instrumentos Virtuais (VI) para os seguintes tipos de sensores: célula de carga, torquímetro, sensor de rotação tipo sensor indutivo e sensor de velocidade tipo radar. No trabalho realizado, implementou-se um sistema de aquisição automática de dados e desenvolveu-se o aplicativo AvaliaMA para avaliação de máquinas agrícolas. O aplicativo AvaliaMA foi desenvolvido buscando a coleta de dados de uma forma eficiente e eliminando os erros tradicionais gerados pela coleta de dados convencional, como anotações incorretas em planilhas e perda de dados. Observou-se, durante ensaios, facilidade de operação do sistema, permitindo rapidez na operação de aquisição de dados, e a capacidade de combinar o sistema implementado para atender a demandas de diversas pesquisas, podendo ser utilizado em diferentes tipos de máquinas agrícolas.

Palavras-chave: automação, labview, mecanização, sensor.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC DATA ACQUISITION COMPUTER PROGRAM FOR EVALUATION OF AGRICULTURAL MACHINES

ABSTRACT

Data acquisition is one of the main problems that engineers and researchers have when are testing agricultural machines, due to the high complexity of these machines. To analyze the performance of a machine, several variables need to be measured. The

objective of this work was to develop an automatic data acquisition computer program for being used in agricultural machine evaluation tests. The system was implemented using the LabVIEW software version 6i. Virtual Instruments (VI) were developed for measuring data from the following sensors: load cell, torquimeter, rotational velocity meter and radar gun. The automatic data acquisition system developed showed, during the tests, capacity to present high precision results. It was found to be robust and versatile and has capacity to be combined in order to be used in different kinds of researches and conditions.

Keywords: automation, labview, mechanization, sensor.

INTRODUÇÃO

A aquisição de dados é uma atividade essencial em todo tipo de tecnologia e ciência. O objetivo de um sistema de aquisição de dados é apresentar, ao observador, os valores das variáveis, ou parâmetros, que estão sendo medidos. Geralmente, este valor numérico, ou medido, não é igual ao valor real da variável, ou seja, o sistema de aquisição tem como entrada o valor real da variável e sua saída é o valor medido.

Uma vez que a tomada de dados é uma das etapas mais tediosas de um ciclo de pesquisa, pode-se automatizar o sistema de aquisição sem comprometer a precisão, reduzindo os erros gerados pela transcrição de dados, eliminando as variações induzidas pelo operador nos processos de coleta de dados e aumentando a taxa de leitura de dados (JOHNSON, 1997).

Atualmente, a maioria de pesquisadores utiliza computadores pessoais (PC) com placas de expansão para aquisição de dados em pesquisas laboratoriais, controle industrial, e em testes e medições. Na agricultura, vários pesquisadores têm trabalhado em diferentes áreas, utilizando algum tipo de sistema de aquisição de dados com a finalidade de monitorar eventos em suas pesquisas. AL-JANOBI (2000) desenvolveu um sistema de aquisição de dados, baseado em transdutores de força e profundidade, para medir a força requerida e a profundidade de trabalho de implementos montados no sistema de três pontos do trator. Com o objetivo de operar automaticamente um pulverizador, CHO e LEE (2000) desenvolveram um controlador "fuzzy", utilizando um receptor de um sistema de posicionamento global diferencial, para determinar a direção do percurso, e quatro sensores ultra-sônicos, para detectar os obstáculos durante a

operação. Já PEDERSEN e PEDERSEN (1995) utilizaram um sistema baseado em detectores infravermelhos passivos e interface de processamento de sinais analógicos para monitorar a atividade de animais domésticos, em campo. Também monitorando animais, ROMETSCH e BECKER (1993) utilizaram um sistema de aquisição de dados portátil para armazenar, continuamente, os batimentos cardíacos de bois durante trabalho de tração.

A versatilidade de um sistema de aquisição também se torna importante, permitindo sua adaptação para diferentes pesquisas. Com o objetivo de medir a força de tração, a velocidade de deslocamento, a rotação e o torque da tomada de potência (TDP), a pressão e o fluxo do sistema hidráulico e a profundidade de trabalho, em tempo real, de implementos sob condições de campo, ARRIVO e Di RENZO (1998) desenvolveram um sistema de aquisição e um programa de processamento de dados, que se mostrou versátil e capaz de ser combinado para atender às demandas de pesquisas específicas.

A obtenção de resultados satisfatórios, a partir de um sistema de aquisição baseado em um PC, depende do computador, de sensores, do condicionamento de sinais e dos equipamentos e programas de aquisição.

Nos equipamentos que se deseja monitorar, ou controlar, são instalados sensores, que transformam um fenômeno físico em sinais elétricos. Os sinais elétricos produzidos variam de acordo com os parâmetros físicos, que estão sendo monitorados, e devem ser condicionados para fornecer sinais apropriados à placa de aquisição de dados. Os acessórios de condicionamento de sinais amplificam, isolam, filtram e excitam sinais para que estes sejam apropriados às placas de aquisição. Uma vez condicionados e trabalhados na forma desejada, os sinais podem ser lidos em computadores, com placas específicas instaladas, e armazenados em diferentes formas, como arquivos de texto.

A configuração, o controle e monitoramento da aquisição de dados podem ser realizados com o auxílio de programas de computador específicos, como o LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) e equipamentos da "National Instruments", que trabalham dentro do conceito de instrumento virtual (VI). A instrumentação virtual tem como objetivo usar um computador comum para criar um aplicativo simulando instrumentos reais com controles e ambiente personalizados, mas com a versatilidade que acompanha o programa de aquisição (JOHNSON, 1997).

O LabVIEW é um ambiente de desenvolvimento de aplicativos, ou instrumentos virtuais, baseado em programação gráfica. Utiliza terminologia, ícones e idéias familiares a técnicos, cientistas e engenheiros, e é baseado em símbolos gráficos ao

invés de linguagem de texto para descrever ações de programação. Sua grande vantagem é que o usuário não necessita conhecer profundamente linguagens ou técnicas de programação para criar um instrumento virtual, ou aplicativo, que é baseado no conceito de fluxo de dados.

Utilizando o programa LabVIEW, KOONTZ (2001) desenvolveu um sistema para irrigação automatizada para ser utilizado por produtores tipicamente não técnicos se tornando uma eficiente ferramenta para monitorar e controlar o uso de água, reduzir custos e documentar a eficiência do uso da água no campo.

THOMOPOULOS (2001) utilizou o programa LabVIEW com a finalidade de desenvolver um sistema controlador automático para um dinamômetro, para controle e monitoramento de motores, capaz de fornecer operação manual e automática e monitorar, exibir e armazenar grande volume de dados, a taxas de leituras elevadas, referente ao desempenho do sistema.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um programa de computador para aquisição automática de dados a ser utilizado na avaliação de máquinas agrícolas, utilizando programas e equipamentos da "National Instruments", buscando a coleta de dados de uma forma eficiente e reduzindo os erros tradicionais gerados pela coleta de dados convencional.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Mecanização Agrícola e no Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial do Departamento de Engenharia Agrícola, na UFV. Esta etapa constou de instalação e configuração de sensores, de componentes e do programa LabVIEW versão 6i, da "National Instruments". Foram utilizados os seguintes componentes:

- SCXI 1321 – bloco de terminais para conectar sinais provenientes dos sensores ao sistema de aquisição;
- SCXI 1121 – módulo condicionador de sinais;
- SCXI 1001 – chassi de suporte das placas do sistema de aquisição;
- DAQCARD AI 16XE-50 – cartão tipo PCMCIA, inserido no computador portátil, para aquisição de dados multifuncional;
- PSHR68-68M – cabo para conexão do cartão PCMCIA ao chassi; e

- SCXI 1349 – cabo SH6868 e adaptador de cabo.

A operação de aquisição automática de dados envolveu os seguintes sensores: célula de carga modelo LCCA 10K da Omega, com capacidade de 45 kN; torquímetro modelo TQ501-10K da Omega, com capacidade de 1130 mN e 6000 rpm; sensor tipo indutivo modelo PS5-18GI50-E da Sense; e sensor de velocidade modelo RVSII da Dickey-John. Foi utilizado, ainda, um computador portátil Compaq Presario para aquisição, processamento e armazenamento de dados.

O esquema de ligação dos componentes, sensores e computador portátil é apresentado na Figura 1.

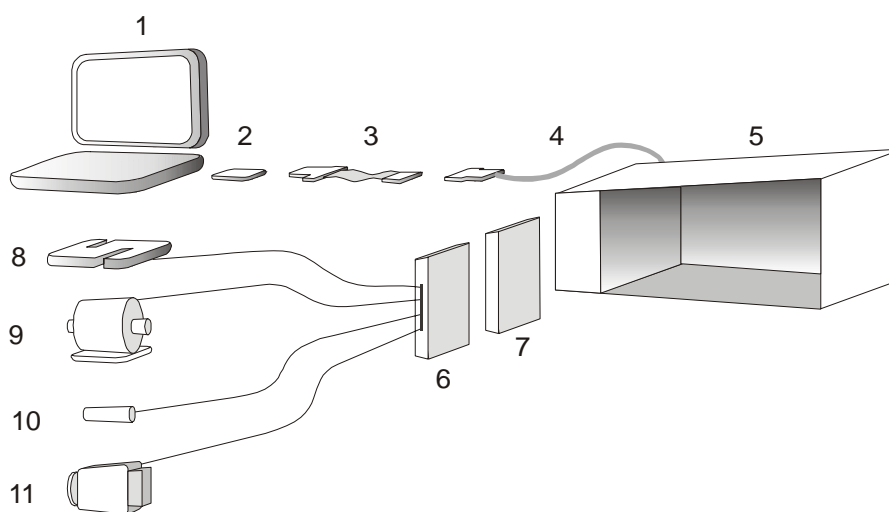


Figura 1 – Esquema de ligação dos componentes da "National Instruments", sensores e computador portátil: 1 – Computador portátil; 2 – DAQCARD AI 16XE-50; 3 – PSHR68-68M; 4 – SCXI 1349; 5 – SCXI 1001; 6 – SCXI 1321; 7 – SCXI 1121; 8 – Célula de carga; 9 – Torquímetro; 10 – Sensor tipo indutivo; 11 – Sensor de velocidade.

A célula de carga converte uma força, agindo sobre ela, em um sinal elétrico analógico através da deformação física de medidores de deformação, que são colados no bloco da célula de carga e são ligados em forma de ponte de Wheatstone. Uma carga aplicada na célula, em compressão ou tensão, produz uma deflexão no bloco, que transmite deformação aos medidores. A deformação produz uma alteração na resistência elétrica proporcional à carga. Normalmente, uma voltagem de excitação é requerida na entrada e a saída pode ser lida em milivoltagem (OMEGA, 1992; HENRY et al., 1991).

O torquímetro é constituído por um dispositivo de anel deslizante integral que é utilizado para transferir sinais elétricos da parte eletrônica rotativa para a parte eletrônica estacionária. O anel deslizante consiste de escovas de grafite que se encostam

ao anel de rotação, fornecendo um percurso elétrico para a excitação de entrada e para a voltagem do sinal de saída de medidores de deformação ligados em forma de ponte de Wheatstone (OMEGA, 1992).

O sensor tipo indutivo é um equipamento eletrônico capaz de detectar a aproximação de peças metálicas, componentes, elementos de máquinas, etc. A detecção ocorre sem que haja contato físico entre o sensor e o acionador, aumentando a vida útil do sensor por não possuir peças móveis sujeitas a desgastes mecânicos. Tem como princípio de funcionamento a geração de um campo eletromagnético de alta frequência, desenvolvido por uma bobina ressonante instalada na face sensora. A bobina faz parte de um circuito oscilador, gerando um sinal senoidal em condição normal e, quando esta é acionada com a proximidade de um metal, a energia do campo é absorvida pelo metal, diminuindo a amplitude do sinal gerado no oscilador. Esta variação é convertida em uma variação contínua que, comparada com um valor padrão, passa a atuar no estágio de saída (SENSE, 2001; BENTLEY, 1995).

O radar é utilizado para medir a velocidade de deslocamento de um objeto, ou veículo, no qual foi instalado. Possui circuitos eletrônicos que emitem um sinal Doppler, em determinada frequência, em direção ao solo. O sinal atinge um obstáculo e uma frequência retorna a um circuito detector. Um microprocessador mede o período de cada ciclo detectado, processando-o e gerando uma frequência de saída correspondente a um número de pulsos por espaço percorrido (DICKY-JOHN, 2001).

Utilizando o programa LabVIEW 6i, desenvolveu-se um VI, ou aplicativo, denominado AvaliaMA, para aquisição automática de dados para coletar, processar e armazenar dados provenientes dos sensores instalados numa máquina agrícola, especificamente, uma colhedora de feijão.

O aplicativo AvaliaMA apresenta ao usuário os dados, enquanto lidos, em tela, na forma gráfica e numérica em tempo real. Tem a função de criar e abrir um arquivo para armazenagem dos dados, adquirir dados provenientes de sensores a uma taxa e frequência de leitura definida, realizar operações aritméticas com os valores lidos e armazenar os dados em arquivo de texto. O aplicativo desenvolvido inicia e continua a leitura, enquanto não ocorre erro interno do sistema de aquisição automática de dados, ou interrupção induzida pelo usuário.

O aplicativo AvaliaMA foi desenvolvido para ler os sinais dos sensores célula de carga e torquímetro, processando-os com a finalidade de obter a média em cada ciclo de leitura.

O aplicativo desenvolvido coleta os sinais do sensor de velocidade, numa taxa de aproximadamente 2900 amostras/s, tendo em cada ciclo 70 amostras lidas, e determina a frequência do sinal numa função desenvolvida especificamente com esta finalidade. O aplicativo AvaliaMA coleta ainda os sinais do sensor indutivo, numa taxa de aproximadamente 90 amostras/s, tendo em cada ciclo 100 amostras lidas, e determina a frequência do sinal numa função desenvolvida especificamente com esta finalidade.

O sistema de aquisição automática de dados, depois de implementado, foi testado preliminarmente com a finalidade de verificar a precisão dos dados provenientes dos sensores e calibrá-los. Para a calibração da célula de carga, foram utilizados pesos determinados em balança de precisão. Os pesos foram aplicados à célula de carga e os sinais gerados pelo sensor foram coletados e processados pelo sistema de aquisição automática de dados e comparados com os valores conhecidos aplicados, obtendo-se a equação de calibração do sensor.

O torquímetro foi montado sob uma base rígida tendo um lado de seu eixo fixado. No outro lado de seu eixo, foi montada uma porca travada com uma chaveta. Uma chave de boca, de comprimento determinado, foi acoplada à porca e pesos conhecidos foram aplicados na outra extremidade da chave. Os sinais gerados pelo sensor foram coletados e processados pelo sistema de aquisição automática de dados e comparados com os valores de torque calculados em função dos pesos aplicados e o comprimento do cabo da chave, obtendo-se a equação de calibração do sensor.

O sensor indutivo de proximidade foi montado próximo a uma peça metálica instalada no eixo de um motor elétrico. Variou-se a rotação do motor e os sinais gerados pelo sensor foram lidos por um freqüencímetro, modelo Minipa APPA ET 2400, e também coletados e processados pelo sistema de aquisição automática de dados. Os dados do freqüencímetro e do sistema de aquisição de dados foram comparados, obtendo-se a equação de calibração do sensor.

O sensor de velocidade foi montado no trator que teve sua velocidade teórica determinada através do deslocamento em pista de teste utilizando um cronômetro. Os sinais gerados pelo radar foram coletados e processados pelo sistema de aquisição automática de dados e comparados com os valores de velocidade teórica conhecidos, obtendo-se a equação de calibração do sensor.

As equações de calibração de cada sensor foram utilizadas na programação do aplicativo desenvolvido para efeito de correção dos dados obtidos pelo aplicativo.

Em seguida, o sistema de aquisição automática de dados foi testado, em condições dinâmicas, comparando-se dados obtidos pelo aplicativo desenvolvido com dados lidos

por outro sistema de leitura, conectado aos mesmos sensores. À célula de carga, foram aplicadas diferentes forças de tração, usando-se dois tratores, sendo um para tracionar, em pista de terra firme, e outro para ser rebocado, com motor desligado em cinco diferentes marchas engatadas. Tomou-se a média de três repetições para cada marcha utilizada. Os dados obtidos pelo aplicativo AvaliaMA e os lidos por indicador digital, modelo Omega DP41-S, foram comparados.

O torquímetro foi instalado na árvore de acionamento de uma colhedora de feijão de arrasto, vazia, que foi acionada por um trator utilizando-se cinco diferentes rotações da TDP, com três repetições. Os dados de torque obtidos pelo aplicativo e os lidos pelo indicador digital foram comparados.

O sensor indutivo, instalado na TDP do trator, foi conectado ao sistema de aquisição automática de dados e ao frequencímetro digital. Os dados obtidos pelo aplicativo e os lidos pelo frequencímetro foram comparados. Tomou-se a média de três repetições, utilizando-se cinco diferentes rotações.

O sensor de velocidade foi montado em trator que se deslocou em pista de terra firme, com 50 m de comprimento, utilizando-se cinco diferentes marchas, com três repetições. Os dados de velocidade de deslocamento obtidos pelo aplicativo e os determinados por medição direta, dividindo-se espaço por tempo, foram comparados.

Após os ensaios preliminares, o sistema de aquisição automática de dados foi montado em uma máquina colhedora de feijão, tracionada por um trator, a fim de avaliar seu desempenho durante a operação de colheita de feijão. A operação de colheita foi realizada na Área Experimental da Epamig e no Laboratório de Automação Agropecuária da Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas, MG. O feijão da variedade Pérola foi utilizado nos ensaios de campo, sendo semeadas 12 a 13 sementes por metro linear em espaçamento de 0,5 m entre linhas.

O trator utilizado no ensaio de campo foi o modelo MF 620 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA), da Massey Ferguson, enquanto a colhedora de feijão utilizada no mesmo ensaio foi a Double Master, produzida pelas Indústrias Reunidas Colombo Ltda. Esta colhedora é uma máquina do tipo de arrasto, que trabalha acoplada à barra de tração do trator e possui um eixo com duas rodas de sustentação. A tomada de potência (TDP) do trator é utilizada para fornecer potência aos órgãos da máquina, como os sistemas de alimentação, trilha, separação, limpeza e transporte do produto ao tanque graneleiro.

A célula de carga foi montada na barra de tração do trator, num dispositivo construído de modo a eliminar forças laterais (Figura 2). Este dispositivo permite a

leitura de forças, apenas, no sentido de tração e compressão. O torquímetro foi montado entre a árvore secundária de acionamento da colhedora e a árvore do cilindro trilhador da colhedora de feijão (Figura 3). O sensor indutivo foi montado na árvore de acionamento primária da colhedora de feijão (Figura 4). Nesta árvore, foi instalada uma peça metálica responsável por gerar os pulsos lidos pelo sensor. O sensor de velocidade foi montado na lateral do trator, na estrutura da escada do operador (Figura 5).



Figura 2 – Detalhe de instalação da célula de carga montada na barra de tração do trator.



Figura 3 – Detalhe de instalação do torquímetro montado entre a árvore secundária de acionamento da colhedora e a árvore do cilindro trilhador da colhedora de feijão.



Figura 4 – Detalhe de instalação do sensor indutivo montado na árvore de acionamento primária da colhedora de feijão.



Figura 5 – Detalhe de instalação do sensor de velocidade montado na lateral do trator.



Figura 6 – Vista geral do sistema de aquisição automática de dados.

Os dados de força de tração requerida pela barra de tração, torque requerido e rotação da TDP, e velocidade de deslocamento da máquina colhedora de feijão foram coletados, em tempo real, pelos sensores célula de carga, torquímetro, sensor indutivo e sensor de velocidade, respectivamente. O conjunto trator-colhedora de feijão foi ensaiado sob diferentes condições de operação, usando-se as velocidades de deslocamento de 4, 7 e 10 km/h, número de leiras de feijão colhido de 4, 7 e 10 leiras, e rotação da TDP de 420 e 540 rpm.

A potência requerida na barra de tração foi calculada a partir dos dados coletados de força de tração requerida na barra de tração e velocidade de deslocamento, conforme a Equação 1.

$$P_{bt} = \frac{Fv}{3,6} \quad \text{eq. 1}$$

em que

P_{bt} = potência requerida na barra de tração, kW;

F = força de tração requerida na barra de tração, kN; e

v = velocidade de deslocamento, km/h.

A potência requerida na TDP foi calculada, a partir dos dados coletados de torque requerido e a rotação da TDP, conforme a Equação 2.

$$P_{tdp} = \frac{Tn}{9549,05} \quad \text{eq. 2}$$

em que

P_{tdp} = potência requerida na TDP, kW;

T = torque requerido na TDP, mN; e

n = rotação da TDP, rpm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando o programa LabVIEW 6i, foi desenvolvido um aplicativo, denominado AvaliaMA, para aquisição automática de dados. O aplicativo foi desenvolvido com a função de apresentar os dados, enquanto lidos, em tela, na forma gráfica e numérica em tempo real (Figura 7).

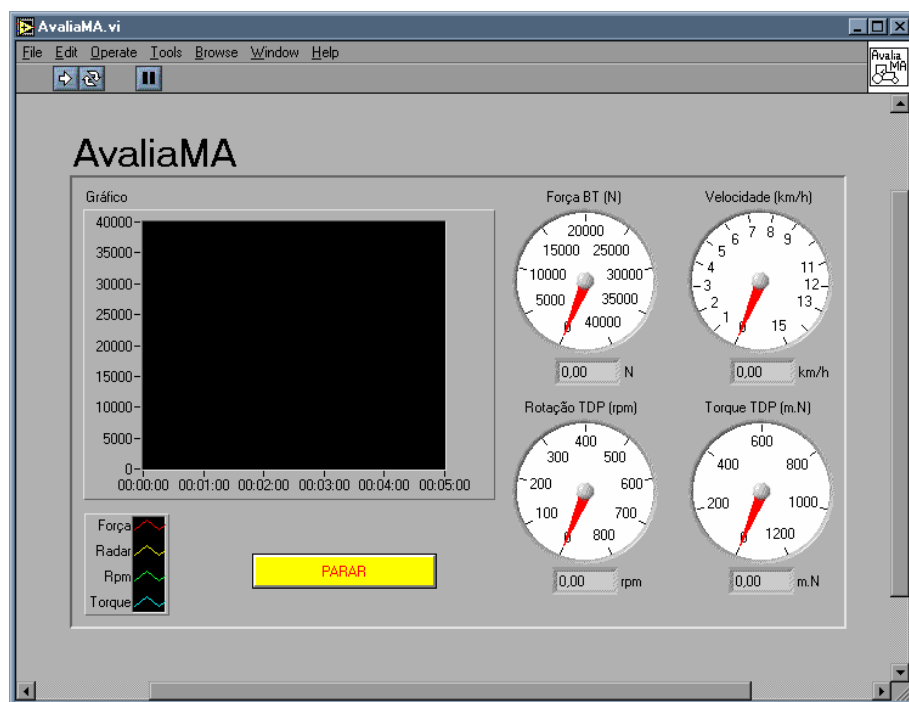


Figura 7 – Tela de apresentação do aplicativo AvaliaMA.

O aplicativo AvaliaMA foi programado para criar e abrir um arquivo para armazenagem dos dados, adquirir dados provenientes de sensores do tipo célula de carga, torquímetro, sensor indutivo e sensor de velocidade a uma taxa e frequência de leitura definida, realizar operações aritméticas com os valores lidos e armazenar os

dados em arquivo de texto. O aplicativo desenvolvido inicia e continua a leitura, enquanto não ocorre erro interno do sistema de aquisição automática de dados, ou interrupção induzida pelo usuário (Figura 8).

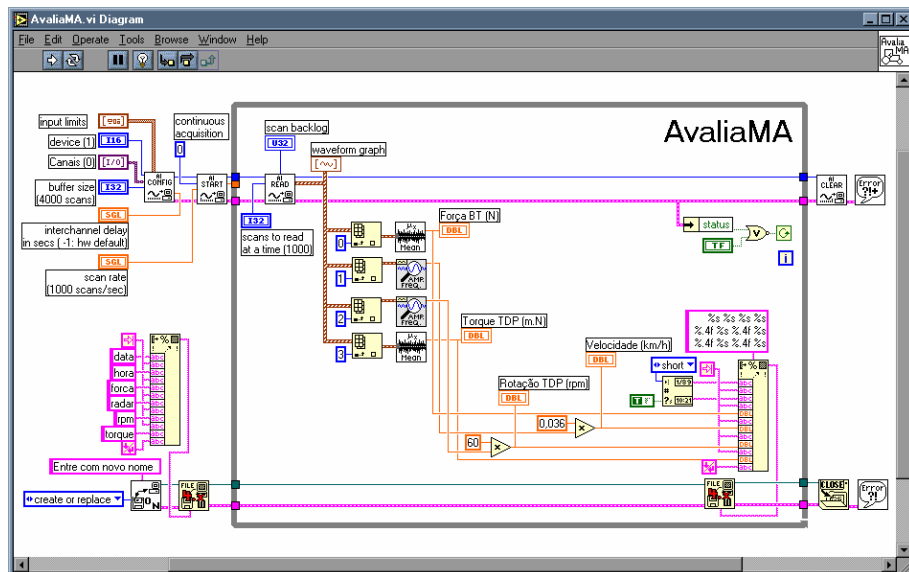


Figura 8 – Tela de programação do aplicativo AvaliaMA.

O aplicativo AvaliaMA gera um arquivo de saída em formato doc em que os dados de saída são organizados em colunas (Tabela 1).

Tabela 1 – Exemplo de arquivo de saída de dados do aplicativo AvaliaMA

Data	Hora	Força (kN)	Velocidade (km/h)	Rotação (rpm)	Torque (mN)
06/09/2001	11:01:11	10,08	5,58	526,38	160,17
06/09/2001	11:01:12	10,07	5,67	520,07	160,77
06/09/2001	11:01:13	11,12	5,66	542,81	204,58
06/09/2001	11:01:14	11,41	5,77	534,74	216,36
06/09/2001	11:01:15	13,13	5,85	533,17	287,63
06/09/2001	11:01:16	16,11	5,66	538,83	411,08
06/09/2001	11:01:17	19,74	5,71	521,90	561,35
06/09/2001	11:01:18	20,35	5,75	525,37	585,69
06/09/2001	11:01:19	19,84	5,79	520,12	564,34
06/09/2001	11:01:20	18,89	5,67	526,35	525,08
06/09/2001	11:01:21	18,11	5,81	529,65	492,75
06/09/2001	11:01:22	17,25	5,72	538,71	457,22
06/09/2001	11:01:23	17,40	5,85	528,39	463,46
06/09/2001	11:01:24	19,08	5,84	524,05	533,06
06/09/2001	11:01:25	17,54	5,69	526,03	468,87
06/09/2001	11:01:26	14,90	5,45	528,80	359,92
06/09/2001	11:01:27	15,07	5,91	546,51	366,55
06/09/2001	11:01:28	15,42	5,77	531,06	381,54
06/09/2001	11:01:29	16,96	5,87	527,07	445,35
06/09/2001	11:01:30	16,47	5,66	530,41	424,22
06/09/2001	11:01:31	16,10	5,77	555,69	408,97
06/09/2001	11:01:32	14,56	5,96	525,34	345,86
06/09/2001	11:01:33	12,97	5,84	548,22	280,15
06/09/2001	11:01:34	12,68	5,72	525,39	268,11
06/09/2001	11:01:35	14,42	5,66	533,08	340,52
06/09/2001	11:01:36	14,71	5,78	526,45	352,21
06/09/2001	11:01:37	14,42	5,77	533,29	340,35
06/09/2001	11:01:38	14,73	5,99	540,23	352,71
06/09/2001	11:01:39	14,07	5,84	525,71	325,38

Os sensores do tipo célula de carga, torquímetro, indutivo e de velocidade foram conectados ao sistema de aquisição automática de dados implementado, e calibrados em laboratório, sendo seus resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Equações de calibração dos sensores

Sensor	Equação	R ²
Célula de carga	$y = 0,9906x - 5,7084$	0,9999
Torquímetro	$y = 0,9427x - 0,1828$	0,9983
Sensor indutivo	$y = 0,9978x + 1,1668$	0,9999
Sensor de velocidade	$y = 0,8217x + 0,0094$	0,9992

O sistema de aquisição automática de dados foi testado, em condições dinâmicas, comparando-se dados obtidos pelo aplicativo desenvolvido com dados lidos por outro

sistema de leitura, conectado aos mesmos sensores. A comparação dos dados lidos pelo aplicativo AvaliaMA com os dados lidos por outro sistema de leitura, durante ensaios dinâmicos, é apresentada nas Figuras 9, 10, 11 e 12.

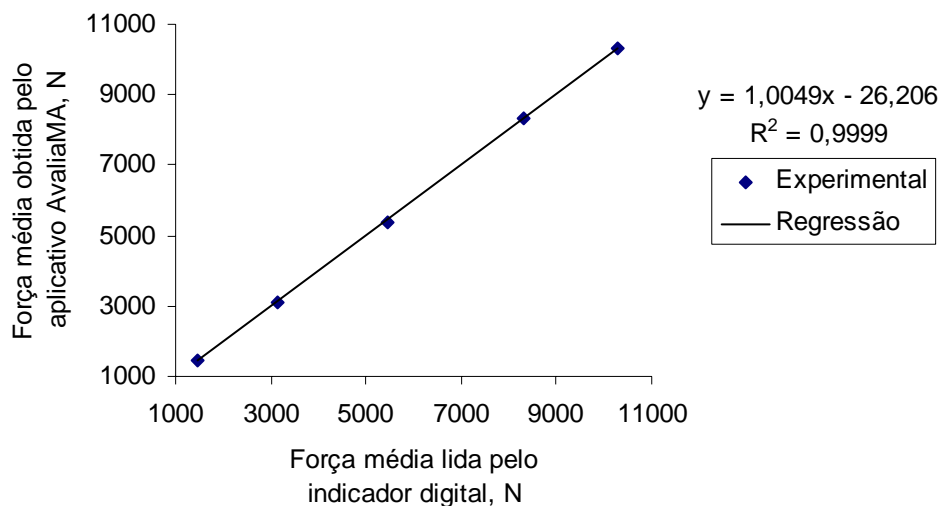


Figura 9 – Comparação dos dados obtidos em ensaios dinâmicos da célula de carga.

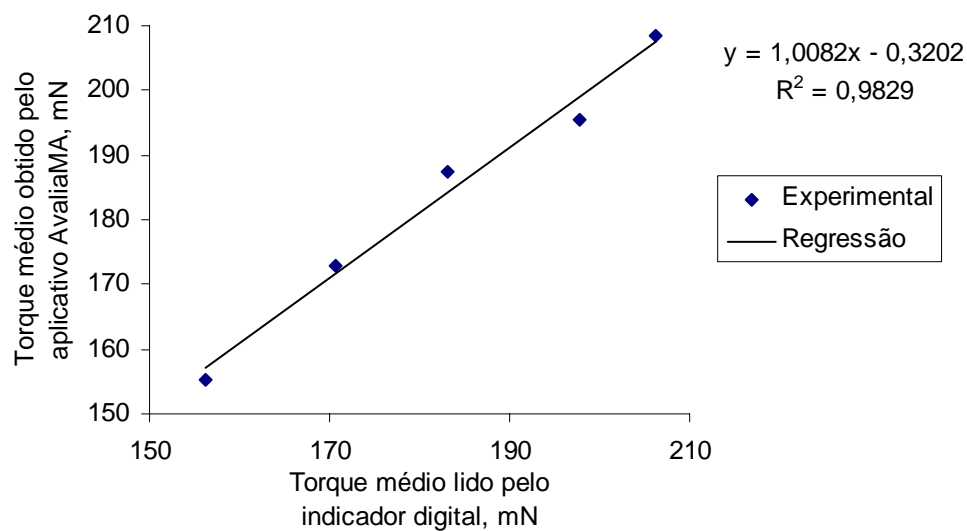


Figura 10 – Comparação dos dados obtidos em ensaios dinâmicos do torquímetro.

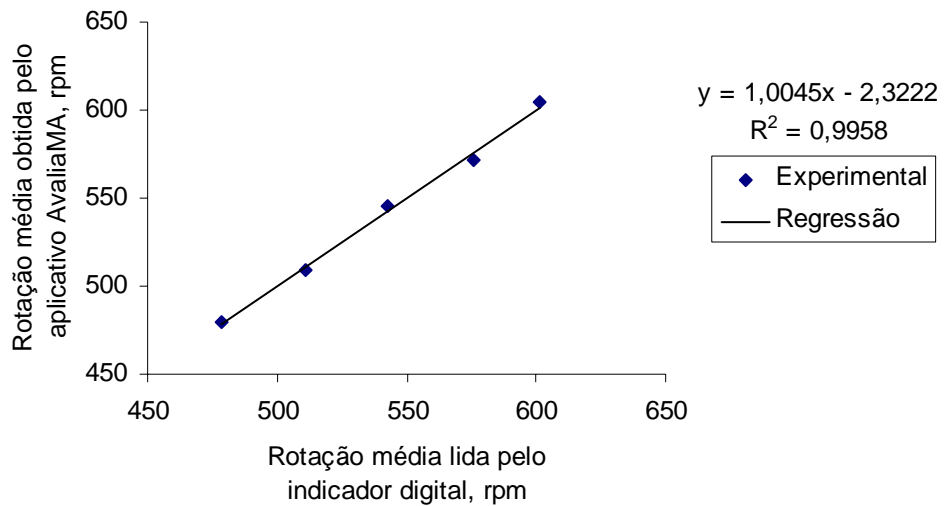


Figura 11 – Comparação dos dados obtidos em ensaios dinâmicos do sensor indutivo.

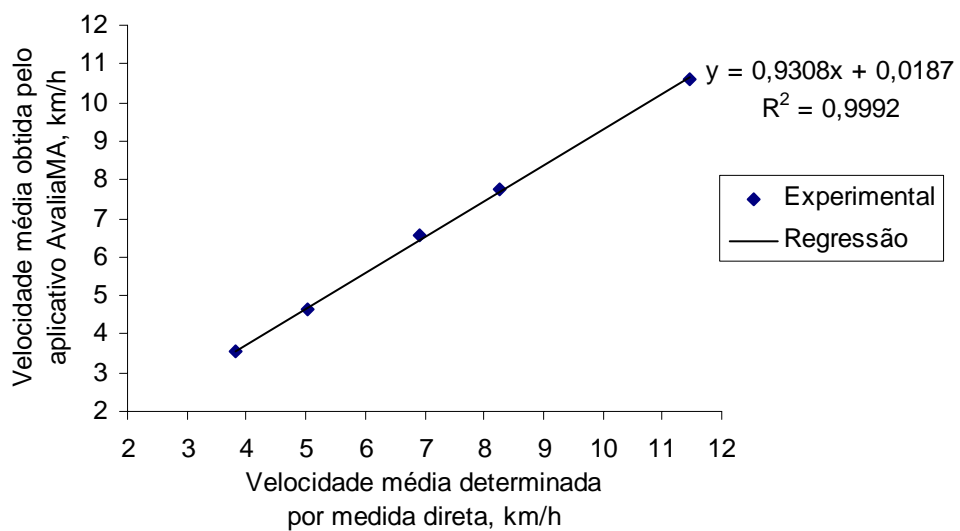


Figura 12 – Comparação dos dados obtidos em ensaios dinâmicos do sensor de velocidade.

Analisando os gráficos de comparação dos ensaios dinâmicos dos sensores (Figuras 9, 10, 11 e 12), observa-se que os sinais obtidos pelo aplicativo, durante os ensaios, quando comparados com dados lidos por sistema de medição digital, apresentaram resposta linear.

CONCLUSÕES

No trabalho realizado, implementou-se um sistema de aquisição automática de dados e desenvolveu-se o aplicativo AvaliaMA para avaliação de máquinas agrícolas.

O aplicativo AvaliaMA foi desenvolvido buscando a coleta de dados de uma forma eficiente e eliminando os erros tradicionais gerados pela coleta de dados convencional, como anotações incorretas em planilhas e perda de dados.

Comparando-se os resultados obtidos com o uso do AvaliaMA com as técnicas tradicionais, obteve-se um R^2 superior a 0,98, em todos os testes realizados, e observou-se o maior erro relativo médio de 8,91%, para a determinação de velocidade de deslocamento.

Observou-se, durante ensaios, facilidade de operação do sistema, permitindo rapidez na operação de aquisição de dados, e a capacidade de combinar o sistema implementado para atender a demandas de diversas pesquisas, podendo ser utilizado em diferentes tipos de máquinas agrícolas.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Programa Redes Cooperativas de Pesquisa (RECOPE/FINEP), pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

À EMBRAPA Milho e Sorgo e à EPAMIG de Sete Lagoas, pelo suporte na realização de testes experimentais.

Às Indústrias Reunidas Colombo, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-JANOBI, A.. A data-acquisition system to monitor performance of fully mounted implements. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 75, n. 2, p. 167-175. 2000.

- ARRIVO, A.; Di RENZO, G. C. Trailed unit for testing implements under field conditions. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 71, n. 1, p. 19-24. 1998.
- BENTLEY, J. P. **Principles of measurement systems**. 3 ed. Singapore: Longman Singapore Publishers Ltd, 1995. 468 p.
- CHO, S. I.; LEE, J. H. Autonomous speedsprayer using differential global positioning system, genetic algorithm and fuzzy control. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 76, n. 2, p. 111-119, 2000.
- DICKEY-JOHN. **Radar II ground speed sensor**. Disponível em: <http://www.dickeyjohn.com/Ag_Products/Radar.htm>. Acesso em: 15 fevereiro 2001.
- HENRY, Z. A.; ZOERB, G. C.; BIRTH, G. S. **Instrument and measurement for environmental sciences**. 3 ed. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1991.
- JOHNSON, G. W. **LabVIEW graphical programming: practical applications in instrumentation and control**. New York: McGraw-Hill. 1997. 665 p.
- KOONTZ, J. D. **Using LabVIEW to automate commercial irrigation**. National Instruments Corporation. Austin, Texas, 1995. Disponível em: <http://digital.ni.com/csma.nsf/IntAllCSDocs/918665FFBA0EBFBF8625692D007898EB?OpenDocument&node=124200_us>. Acesso em: 29 maio 2001.
- OMEGA. **The pressure strain and force handbook**. Ed. Omega Engineering, INC. v. 28, 1992.
- PEDERSEN, E.; PEDERSEN, C. B. Animal activity measured by infrared detectors. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 61, n. 4, p. 239-246. 1995.
- ROMETSCH, M.; BECKER, K. Determination of the reaction of heart rate of oxen to draught work with a portable data-acquisition system. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 54, n. 1, p. 29-36, 1993.
- SENSE. **SENSE: sensores e instrumentos**. Disponível em: <<http://www.sense.com.br>>. Acesso em: 15 fevereiro 2001.

THOMOPOULOS, P. **Real-time dynamometer control with LabVIEW**. National Instruments Corporation. Austin, Texas, 1996. Disponível em: <http://digital.ni.com/csma.nsf/IntAllCSDocs/3D4448906DB5270E8625692D00789697?OpenDocument&node=124200_US>. Acesso em: 29 maio 2001.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM CONJUNTO TRATOR-COLHEDORA DE FEIJÃO

RESUMO

Estudos sobre a otimização do processo de colheita de grãos, dentre estes os de feijão, têm sido realizados através do desenvolvimento e aperfeiçoamento de mecanismos e máquinas agrícolas. A otimização é feita com a finalidade de aumentar o desempenho operacional de máquinas, tornando-as mais eficientes e seguras, bem como aumentar a qualidade dos grãos colhidos. A avaliação do desempenho operacional de uma máquina, ou conjunto mecanizado, viabiliza o seu emprego de forma técnica e economicamente organizada. Na execução de operações exigidas pela produção agrícola, pode-se atingir o máximo de rendimento útil com um mínimo de dispêndio de energia, de tempo e dinheiro. É possível, então, a partir da avaliação do desempenho, eleger os critérios racionais de escolha e manejo de máquinas e implementos agrícolas que executarão as operações agrícolas, em estudo, mantendo a operação rentável. Diante disso, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o desempenho operacional de um conjunto trator-colhedora de feijão. Foi utilizado um sistema de aquisição automática de dados, da "National Instruments", o que permitiu a coleta de dados, em tempo real, da força de tração requerida pela barra de tração, torque requerido e rotação da tomada de potência (TDP), além da velocidade de deslocamento da colhedora de feijão. Foram determinadas, também, a capacidade de processamento da máquina e as perdas ocorridas na área. O maior valor de torque requerido na TDP observado, durante os ensaios de campo para a rotação de 420 rpm na TDP, foi de 730,84 mN, resultando numa potência requerida na TDP de 26,79 kW, enquanto para a condição de 540 rpm foi de 907,21 mN, resultando numa potência requerida na TDP de 47,96 kW. O conjunto apresentou, durante os ensaios de campo, capacidade de processamento de 3,06 t/h, para uma área com produtividade média de 2186,63 kg/ha. Os valores de perdas para os sistemas da plataforma de recolhimento, trilha e separação, e limpeza encontrados foram de 114,93, 72,11, e 9,11 kg/ha, respectivamente, totalizando cerca de 11,15 % de perdas.

Palavras-chave: LabVIEW, mecanização, sensor.

EVALUATING THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF A TRACTOR-HARVESTER SYSTEM FOR BEANS

ABSTRACT

The beans harvesting system has been optimized by improving the mechanisms and the machines used. The objectives of the optimization works have been to increase the performance, efficiency and safety of the machines and to set the harvested product with better quality. The objective of this work was to evaluate the operational performance of a tractor-harvester system for beans. The work was done using a "National Instruments" automatic data acquisition to acquire the traction force, torque and rotational velocity of the power take-off (PTO) and the system velocity. The processing capacity and the loss values were found. The largest torque requirement, at 420 rpm PTO conditions, was 730.84 mN, resulting in a 26.79 kW PTO power requirement and the largest torque requirement, at the 540 rpm PTO conditions, was 907.21 mN, resulting in a 47.96 kW PTO power requirement. The tractor-harvester system for beans showed, during field tests, a processing capacity of 3.06 t/h for a production field condition of 2,186.63 kg/ha. The loss values were 114.93, 72.11, 9.11 kg/ha for the gathering, threshing and separation, and cleaning systems, respectively, founding a total loss of 11.15 %.

Keywords: harvest, mechanization, sensor.

INTRODUÇÃO

O Brasil é considerado, atualmente, grande produtor de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) tanto em produção como em área cultivada, atingindo na safra 2001/2002, segundo índices da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), 3,26 milhões de toneladas, com área plantada de 4,21 milhões de hectares (BRASIL, 2002).

O hábito de consumo de feijão pela família brasileira, tanto nas cidades como no meio rural, associado à ampla adaptação climática dessa cultura, faz com que ela seja distribuída por todo o território nacional. Sendo considerado uma das espécies de leguminosas mais importantes no País, o feijão representa a principal fonte de proteína

das populações de baixa renda, sendo o mais utilizado na dieta da população como substituto de proteínas animais, além de ser um produto de destacada importância nutricional, econômica e social (ZIMMERMANN et al., 1988).

Durante o ciclo da cultura do feijão, são adotadas práticas que visam à obtenção de um produto final de alto valor comercial. A colheita, etapa final da cultura, se não for bem conduzida, poderá invalidar esforços e insumos aplicados nas fases anteriores, comprometendo a qualidade e a conservação dos grãos (CONTO et al., 1980). Segundo SRIVASTAVA et al. (1993), o objetivo da colheita de grãos é recolhê-los do campo e separá-los do resto do material colhido de maneira oportuna com o mínimo de perdas, mantendo sua alta qualidade.

O processo completo de colheita do feijão pode ser dividido em arranquio, enleiramento, recolhimento, trilha, separação e limpeza. Os métodos e equipamentos utilizados na colheita dependem da variedade do produto, do método de plantio e das condições climáticas. Dependendo do método empregado, as etapas de colheita podem ser realizadas manualmente, por diferentes máquinas, ou podem ser combinadas em uma única máquina capaz de realizar todas as operações.

Segundo CONTO et al. (1980) e SILVA et al. (1994), a quase totalidade dos agricultores utiliza a prática de colheita manual, que consiste em arrancar as plantas inteiras quando elas encontram-se quase despidas de folhas. As plantas arrancadas permanecem na lavoura para completar o processo de secagem e, em seguida, são transportadas para um terreiro, onde é feita a trilha, utilizando-se bateção manual ou mecânica, ou, então, são enleiradas na própria lavoura para recolhimento mecânico.

A mecanização do processo de colheita do feijão implica em economia de tempo e energia, além de eliminar uma tarefa tediosa. Além disto, a colheita corresponde a cerca de 60 % dos custos de todo o ciclo produtivo (ROBLES et al., 1997).

A realização de estudos voltados para o conhecimento do desempenho dos sistemas que englobam uma atividade agrícola, como a colheita, é importante para se propor melhorias nas máquinas (SOUZA, 2001 a). Estudos sobre a otimização do processo de colheita de grãos, dentre estes os de feijão, têm sido realizados através do desenvolvimento e aperfeiçoamento de mecanismos e máquinas, melhorando seu desempenho operacional, tornando-os mais eficientes e seguros, e a qualidade dos grãos colhidos e reduzindo as perdas ocorridas durante o processo de colheita mecânica. Segundo MIALHE (1996), o desempenho operacional é o conjunto de informações de características operacionais, dinâmicas e de manejo que representam uma medida do

comportamento da maquinaria agrícola ao executar operações sob determinadas condições de trabalho.

Devido à necessidade de se conhecer o desempenho de máquinas destinadas à colheita (recolhimento) de feijão, aliada à importância da cultura para o Brasil, autores têm trabalhado avaliando seu desempenho.

SOUZA (2001 a) avaliou o desempenho de uma colhedora de feijão de arrasto, modelo Double Master, das Indústrias Reunidas Colombo, estudando as exigências energéticas, a capacidade de processamento, as perdas ocasionadas no processo de colheita, a qualidade do produto colhido e o nível de ruído emitido pelo conjunto trator-colhedora. Posteriormente, o autor implementou um modelo matemático de simulação da trilha e separação mecânica da colhedora, validando-o por meio da comparação entre resultados simulados com resultados obtidos experimentalmente.

SOUZA (2001 b), também trabalhando com colheita mecanizada do feijão, avaliou o desempenho de uma colhedora de feijão, da Indústria Nux Maquinagrícola, modelo RXT 350, na região da Zona da Mata de Minas Gerais, levando-se em consideração uma exploração mais segura e econômica das propriedades agrícolas. O autor observou, em testes de desempenho, a melhor capacidade de recolhimento de 2,77 t/h, inclinação-limite do terreno para tráfego com estabilidade transversal do conjunto trator-colhedora de 31% e níveis de ruído superiores ao limite diário estabelecido por normas.

A vantagem de conhecer o desempenho operacional de uma máquina agrícola consiste na possibilidade de empregar uma seleção racional. Esta mecanização racional, segundo MIALHE (1974), consiste em empregar um sistema, ou conjunto de máquinas, de forma técnica e economicamente organizada, na execução das operações exigidas pela produção agrícola. O emprego da mecanização racional permite obter o máximo de rendimento útil com um mínimo de dispêndio de energia, de tempo e dinheiro, permitindo a eleição de critérios racionais de escolha e manejo de máquinas e implementos agrícolas que executarão as operações agrícolas, em estudo.

Atualmente, os agricultores trabalham diante de problemas, como a elevação dos custos de produção e queda dos preços do mercado. Como resultado, eles precisam de todas as vantagens a fim de produzir safras de forma eficiente e baixos custos. Embora os agricultores não possam controlar as diferentes variáveis que influenciam os custos de produção, existem áreas que podem ser controladas e aperfeiçoadas. Uma dessas áreas é a operação e manejo das máquinas agrícolas como a seleção adequada do conjunto trator-máquina agrícola (GREEN et al., 1985).

Outro problema enfrentado pelos produtores de feijão é o controle do índice de perdas durante a colheita mecanizada. O retorno financeiro depende, além da qualidade final do produto, também da quantidade colhida. Daí a preocupação em realizar a colheita com o mínimo de perdas possível, evitando prejuízos.

É importante conhecer a capacidade de uma máquina, a fim de selecionar a potência e o equipamento que desempenharão as operações de campo em tempo. Mas, é também importante evitar custos adicionais de máquinas superdimensionadas (BOWERS, 1992).

Diante disso, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o desempenho operacional de um conjunto trator-colhedora de feijão determinando-se as características operacionais, dinâmicas e de manejo do conjunto durante a operação de colheita.

MATERIAL E MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho foi realizada no Laboratório de Mecanização Agrícola e no Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial do Departamento de Engenharia Agrícola, na UFV. Esta etapa constou de instalação e configuração de sensores, e de equipamentos de aquisição automática de dados da "National Instruments".

A avaliação do desempenho do conjunto trator-colhedora de feijão, durante operação de colheita, foi realizada na Área Experimental da Epamig e no Laboratório de Automação Agropecuária da Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas, MG. A área em que foi realizada a avaliação está localizada nas coordenadas geográficas 19°28' latitude sul e longitude 44°15'08" W, que tem como solos predominantes os Latossolos Vermelho-Escuro e Vermelho-Amarelo. A cultura de feijão, para a qual o conjunto trator-colhedora de feijão foi avaliado, apresentava as seguintes características:

- variedade	Pérola
- número de sementes por metro linear	12 a 13
- espaçamento entre linhas	0,5 m
- diâmetro médio dos grãos (DMG)	13,66 mm
- umidade média dos grãos	13,55 % b.u.
- relação de massa de palha/massa de grão	0,82

- relação de massa/volume de palha 14,72 kg/m³

No ensaio de campo, foi utilizado o trator modelo MF 620 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA), da Massey Ferguson. Este trator apresenta as seguintes características, segundo o fabricante:

- potência do motor, na rotação nominal (2200 rpm) 77,2 kW (105 cv)
- potência máxima na TDP 68,8 kW (93,5 cv)
- torque máximo no motor @ 1400 rpm 402 mN (41 mkgf)
- peso máximo com lastro 6000 kg
- carga sobre o eixo dianteiro (condição estática) 36 %
- carga sobre o eixo traseiro (condição estática) 64 %
- pneus dianteiros R1 14,9-24
- pneus traseiros R1 18,4-34

A colhedora de feijão utilizada no ensaio de campo foi a Double Master (Figura 1), produzida pelas Indústrias Reunidas Colombo Ltda. Esta colhedora é de arrasto, trabalhando acoplada à barra de tração do trator, e possui um eixo com duas rodas de sustentação. A TDP do trator é utilizada para fornecer potência aos componentes da máquina, tais como os sistemas de alimentação, trilha, separação, limpeza e transporte do produto ao tanque graneleiro.

Esta máquina apresenta as seguintes características técnicas, segundo o fabricante:

- tração e acionamento trator
- potência mínima do trator para acionamento 88 kW (120 cv)
- rotação nominal de trabalho 540 rpm
- largura total 2,45 m
- bitola 2,12 m
- altura 3,25 m
- comprimento 6,30 m
- peso total (graneleiro vazio) 3350 kg
- capacidade de produção (estimada) até 30 t/dia



Figura 1 – Colhedora de feijão Double Master.

Sistema de aquisição automática de dados

A operação de aquisição automática de dados envolveu os seguintes sensores: célula de carga modelo LCCA 10K da Omega, com capacidade de 45 kN; torquímetro modelo TQ501-10K da Omega, com capacidade de 1130 mN e 6000 rpm; sensor tipo indutivo modelo PS5-18GI50-E da Sense; e sensor de velocidade modelo RVSII da Dickey-John. Foi utilizado, ainda, um computador portátil Compaq Presario para aquisição, processamento e armazenamento de dados.

Utilizando o programa de computador LabVIEW 6i, da "National Instruments", um instrumento virtual, denominado AvaliaMA, para aquisição automática de dados foi desenvolvido, para coletar, processar e armazenar dados provenientes dos sensores instalados no conjunto trator-colhedora de feijão.

O sistema de aquisição automática de dados, depois de implementado, foi testado preliminarmente com os sensores, previamente, calibrados em laboratório.

Após o ensaio preliminar, o sistema de aquisição automática de dados foi montado em uma máquina colhedora de feijão, tracionada por um trator, com a finalidade de avaliar seu desempenho durante operação de colheita.

A célula de carga foi montada na barra de tração do trator, num dispositivo construído apropriadamente para eliminar forças laterais (Figura 2). Esse dispositivo permite a leitura de forças, apenas no sentido de tração e compressão. O torquímetro foi montado entre a árvore secundária de acionamento da colhedora e a árvore do cilindro

trilhador da colhedora de feijão (Figura 3). A embreagem, localizada entre estas duas peças, foi travada. O sensor indutivo foi montado na árvore de acionamento primária da colhedora de feijão (Figura 4). Nesta árvore, foi instalada uma peça metálica responsável por gerar os pulsos lidos pelo sensor. O sensor de velocidade foi montado na lateral do trator, na estrutura da escada do operador (Figura 5). O sensor foi montado, voltado para trás, tomando-se o cuidado para não haver interferência da roda do trator no feixe de leitura do sensor.



Figura 2 – Detalhe de instalação da célula de carga montada na barra de tração do trator.



Figura 3 – Detalhe de instalação do torquímetro montado entre a árvore secundária de acionamento da colhedora e a árvore do cilindro trilhador da colhedora de feijão.



Figura 4 – Detalhe de instalação do sensor indutivo montado na árvore de acionamento primária da colhedora de feijão.



Figura 5 – Detalhe de instalação do sensor de velocidade montado na lateral do trator.



Figura 6 – Vista geral do sistema de aquisição automática de dados.

Dados da força de tração requerida pela barra de tração, torque requerido e rotação da TDP, e velocidade de deslocamento da máquina colhedora de feijão foram coletados, em tempo real, pelos sensores célula de carga, torquímetro, sensor indutivo e sensor de velocidade, respectivamente. O conjunto trator-colhedora de feijão foi ensaiado sob diferentes condições de operação, com velocidades de deslocamento de 4, 7 e 10 km/h, número de linhas de feijão na leira colhida de 4, 7 e 10 leiras e rotação da TDP de 420 e 540 rpm. Foi montado um experimento em esquema fatorial de 3x3x2, com três velocidades, três linhas e duas rotações, instalado em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Cada tratamento foi realizado em linha de 50 m de comprimento. Os dados obtidos foram submetidos às análises de regressão linear simples e múltipla. Os modelos foram escolhidos, com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t a 5% e o coeficiente de determinação. A análise estatística dos dados foi realizada, utilizando-se o programa de computador SAEG 8.0.

Avaliação do desempenho operacional do conjunto trator-colhedora de feijão

Na avaliação do desempenho operacional do conjunto trator-colhedora de feijão, foram determinadas as características operacionais, dinâmicas e de manejo que representavam o comportamento do conjunto trator-colhedora de feijão durante a operação de colheita.

A potência requerida na barra de tração foi calculada, a partir dos dados coletados de força de tração requerida na barra de tração e velocidade de deslocamento, conforme a Equação 1.

$$P_{bt} = \frac{Fv}{3,6} \quad \text{eq. 1}$$

em que

P_{bt} = potência requerida na barra de tração, kW;

F = força de tração requerida na barra de tração, kN; e

v = velocidade de deslocamento, km/h.

A potência requerida na TDP foi calculada, a partir dos dados coletados de torque requerido e a rotação da TDP, conforme a Equação 2.

$$P_{tdp} = \frac{Tn}{9549,05} \quad \text{eq. 2}$$

em que

P_{tdp} = potência requerida na TDP, kW;

T = torque requerido na TDP, mN; e

n = rotação da TDP, rpm.

A capacidade de processamento da colhedora de feijão representa a produção da máquina medida no campo, durante certo intervalo de tempo. O conjunto trator-colhedora de feijão foi ensaiado, sob condições reais de operação, e sua capacidade foi determinada, medindo-se a produção da máquina por unidade de tempo, não levando em consideração os tempos perdidos com manobras de cabeceira, descarregamento, manutenção, etc.

A avaliação de perdas foi feita através de amostragens, durante os ensaios, quando foi recolhido o material perdido em diferentes setores da máquina. A massa obtida destes foi convertida em perda por unidade de área (kg/ha).

Inicialmente, foi feita uma avaliação das perdas naturais da cultura. Para isto, uma área de 2 m² foi marcada com uma armação, onde foram coletados os grãos soltos e os contidos em vagens que estavam no chão ou acamados fora do alcance da plataforma

recolhedora, sendo estes contabilizados para efeito de cálculo. A área de 2 m² foi considerada como sendo um retângulo com largura equivalente ao número de linhas na leira colhida multiplicado pelo espaçamento entre linhas, sendo o comprimento do retângulo a medida para complementar os 2 m² restantes. Foram determinadas cinco repetições para cada leira. A determinação de perdas naturais foi feita segundo a equação

$$P_n = \frac{M_n}{S} 10 \quad \text{eq. 3}$$

em que

P_n = perdas naturais, kg/ha;

M_n = massa de grãos perdidos naturalmente na área, g; e

S = área da armação, m².

As perdas ocorridas durante o arranquio e enleiramento são aquelas oriundas da manipulação manual do produto, antes da fase de recolhimento mecânico.

A determinação das perdas ocorridas durante o arranquio e enleiramento foi feita, amostrando-se uma área de 2 m², antes da passagem da colhedora de feijão. Foram coletados os grãos soltos e os contidos em vagens que estavam no chão ou acamados fora do alcance da plataforma recolhedora. A determinação de perdas no arranquio e enleiramento foi feita segundo a equação

$$P_a = \frac{M_a}{S} 10 \quad \text{eq. 4}$$

em que

P_a = perdas ocorridas durante o arranquio e enleiramento, kg/ha; e

M_a = massa de grãos, g.

As perdas totais referem-se aos grãos perdidos pelos mecanismos de recolhimento (plataforma), trilha, separação e limpeza, incluindo as perdas ocorridas durante o arranquio e enleiramento e as perdas naturais que ocorrem na área.

A determinação das perdas totais foi feita, amostrando-se uma área de 2 m², após a passagem da máquina, obtendo-se a quantidade de grãos soltos e daqueles contidos em vagens. O cálculo foi feito conforme a seguinte equação

$$P_t = \frac{M_t}{S} 10 \quad \text{eq. 5}$$

em que

P_t = perdas totais, kg/ha; e

M_t = massa de grãos perdidos totalmente, g.

As perdas ocorridas na plataforma da colhedora de feijão foram avaliadas, interrompendo-se a operação normal desta e dando-se marcha-a-ré por um espaço de, no máximo, igual ao comprimento da máquina. Neste espaço, foi feita a demarcação da área a ser coletada e procedeu-se à coleta de grãos soltos e daqueles contidos em vagens. A determinação das perdas ocorridas na plataforma de recolhimento foi feita através da seguinte relação

$$P_r = \frac{M_p - (M_n + M_a)}{S} 10 \quad \text{eq. 6}$$

em que

P_r = perdas ocorridas na plataforma de recolhimento, kg/ha; e

M_p = massa de grãos perdidos após a passagem da plataforma, g.

As perdas ocorridas nos sistemas de trilha e de separação foram obtidas, recolhendo-se o produto na saída lateral de material da colhedora de feijão. A determinação de perdas ocorridas nos sistemas de trilha e de separação foi feita segundo a equação

$$P_{tr} = \frac{M_v}{S} 10 \quad \text{eq. 7}$$

em que

P_{tr} = perdas ocorridas nos sistemas de trilha e separação, kg/ha; e

M_v = massa de grãos perdidos na saída lateral de material da colhedora de feijão, g.

As perdas ocorridas no sistema de limpeza foram obtidas, recolhendo-se os grãos soltos e os contidos em vagens na saída posterior de material da colhedora de feijão. A determinação de perdas ocorridas no sistema de limpeza foi feita segundo a equação

$$P_l = \frac{M_l}{S} 10 \quad \text{eq. 8}$$

em que

P_l = perdas ocorridas no sistema de limpeza, kg/ha; e

M_l = massa de grãos perdidos na saída posterior de material da colhedora de feijão, g.

A taxa de alimentação total estimada (palhas e grãos) colhida pela colhedora de feijão foi calculada, em função do número de linhas enleiradas, espaçamento entre as fileiras, velocidade longitudinal do sistema, produtividade do feijão e da relação, em massa, de palha e grão da cultura (Equação 9).

$$q = \frac{P_a n e v (1 + x)}{10000} \quad \text{eq. 9}$$

em que

q = taxa de alimentação total estimada da colhedora de feijão, kg/s;

P_a = produtividade média de toda área colhida, kg/ha;

n = número de linhas enleiradas, adimensional;

e = espaçamento entre fileiras, m;

v = velocidade de deslocamento, m/s; e

x = relação, em massa, de palha e grão, adimensional.

A determinação do teor de umidade do feijão colhido foi feita colhendo-se amostras de aproximadamente 25 g no graneleiro, para cada teste de perda. As amostras

foram pesadas antes e depois de terem sido colocadas para secar em estufa a 103 ± 2 °C, por 24 h. O teor de umidade foi então calculado pela seguinte equação:

$$U_{bu} = \frac{100(m_u - m_s)}{m_u} \quad \text{eq. 10}$$

em que

U_{bu} = teor de umidade em base úmida, %;

m_u = massa do material úmido, g; e

m_s = massa do material seco, g.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o desempenho operacional de um conjunto trator-colhedora de feijão.

O conjunto trator-colhedora de feijão trabalhou com duas rotações diferentes da TDP, três diferentes marchas e três diferentes números de linhas de feijão colhido na leira.

Com a finalidade de estudar a relação da potência requerida na TDP em função das variáveis número de linhas na leira, velocidade de deslocamento e rotação da TDP, foi feita uma análise de regressão linear destes parâmetros. O modelo estatístico que melhor descreveu o comportamento da potência requerida na TDP em função das variáveis monitoradas dentro das faixas de 4 a 10 linhas de feijão na leira, velocidade de deslocamento de 4 a 10 km/h e rotação da TDP de 420 a 540 rpm é representado pela Equação 11.

$$\hat{P}_{req} = -15,864 + 0,746L + 1,038V + 0,042R \quad R^2 = 0,66 \quad \text{eq. 11}$$

em que

\hat{P}_{req} = potência requerida na TDP, kW;

L = número de linhas na leira, adimensional;

V = velocidade de deslocamento, km/h; e

R = rotação da TDP, rpm.

A potência requerida na TDP é, diretamente, proporcional ao número de linhas na leira, velocidade de deslocamento, fatores estes que determinam a taxa de alimentação total de grãos, e à rotação da TDP. Incrementando o número de linhas na leira e, ou a velocidade de deslocamento, aumenta-se a taxa de alimentação de forma diretamente proporcional. O incremento da taxa de alimentação eleva o volume de massa de grãos e palha dentro dos mecanismos de trilha, separação e limpeza da máquina, acarretando um aumento do torque requerido em decorrência do aumento da resistência oferecida pelo sistema. Uma vez que a potência requerida é diretamente proporcional ao torque (Equação 2), ocorre, conseqüentemente, um incremento da potência requerida na TDP. A rotação da TDP também se apresentou como um fator que afeta a potência requerida na TDP de forma diretamente proporcional, fato também observado por SOUZA (2001 a).

A Figura 7 apresenta o efeito da taxa de alimentação total da colhedora no torque requerido na TDP, para os ensaios realizados com rotação da TDP de 420 e 540 rpm. O torque requerido na TDP apresentou-se diretamente proporcional à taxa de alimentação total da colhedora de feijão, fato também verificado na Equação 9, uma vez que a potência é função do torque (Equação 2).

O modelo que melhor descreveu a relação entre a taxa de alimentação total e o torque requerido na TDP, para qualquer faixa de rotação, pode ser representado por um comportamento linear através da Equação 12.

$$\hat{T}_{req} = 150,103 + 80,528q \quad R^2 = 0,60 \quad \text{eq. 12}$$

em que

\hat{T}_{req} = torque requerido na TDP, mN; e

q = taxa de alimentação total da máquina, kg/s.

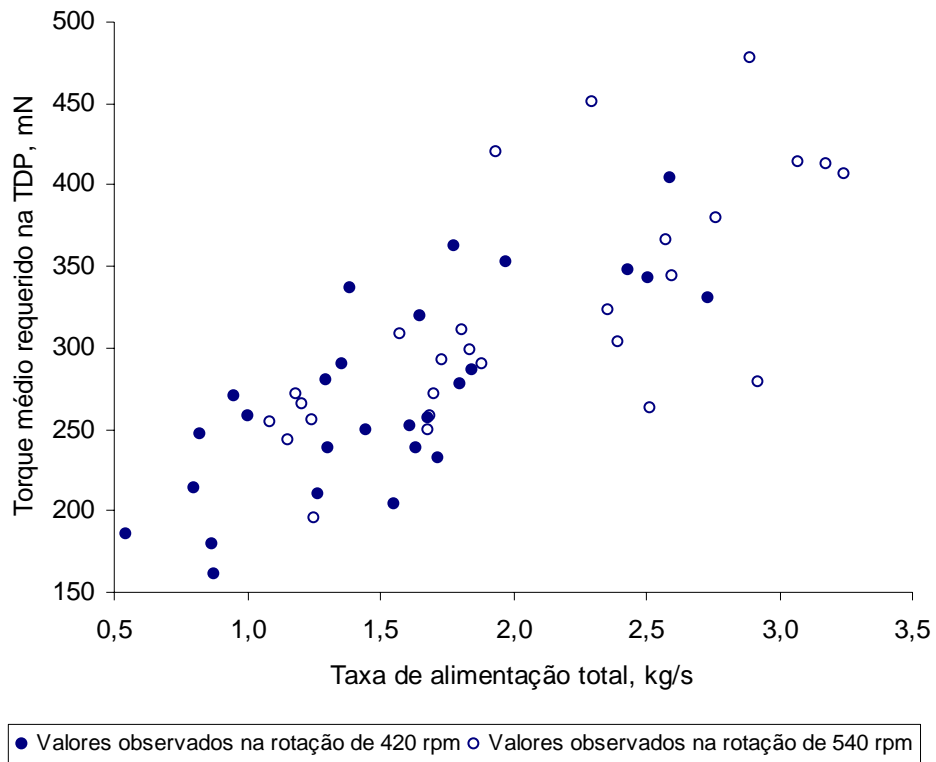


Figura 7 – Efeito da taxa de alimentação total no torque requerido na TDP, para as rotações de 420 e 540 rpm.

As condições de trabalho variaram, continuamente, durante os testes de colheita de feijão. As variações de taxa de alimentação total estimada, rotação da TDP, torque e potência requeridos na TDP em função do tempo, para um teste realizado com tratamento de 10 linhas na leira, velocidade de deslocamento de 10 km/h e rotação da TDP de 540 rpm, são apresentados nas Figuras 8, 9, 10 e 11.

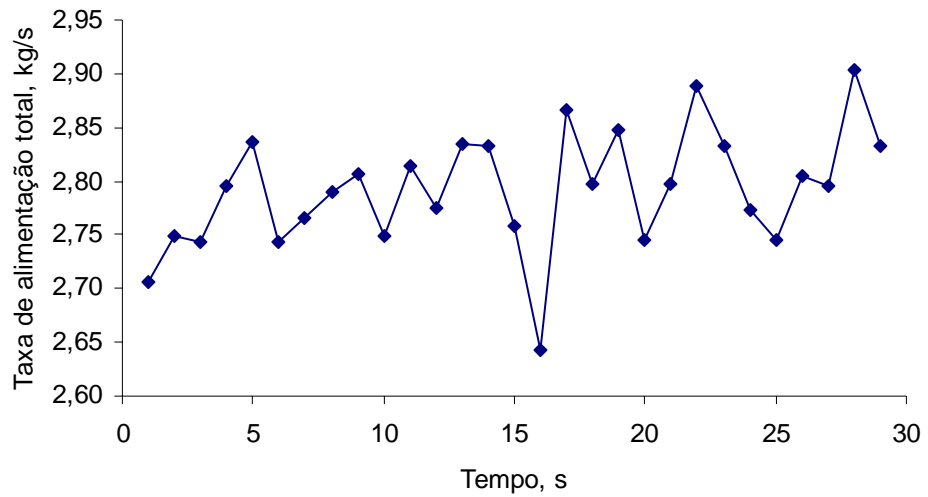


Figura 8 – Variação da taxa de alimentação total estimada da colhedora em função do tempo, durante ensaio com tratamento de 10 linhas na leira, velocidade de 10 km/h e rotação da TDP de 540 rpm.

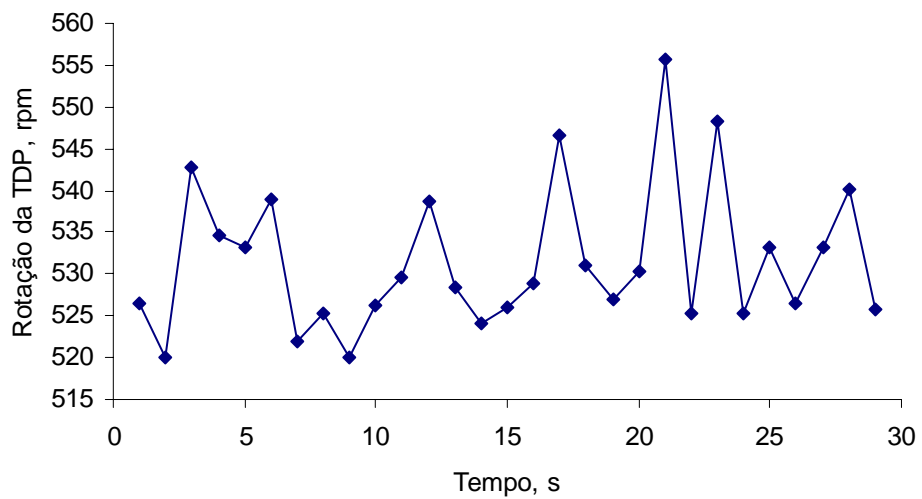


Figura 9 – Variação da rotação da TDP em função do tempo, durante ensaio com tratamento de 10 linhas na leira, velocidade de 10 km/h e rotação da TDP de 540 rpm.

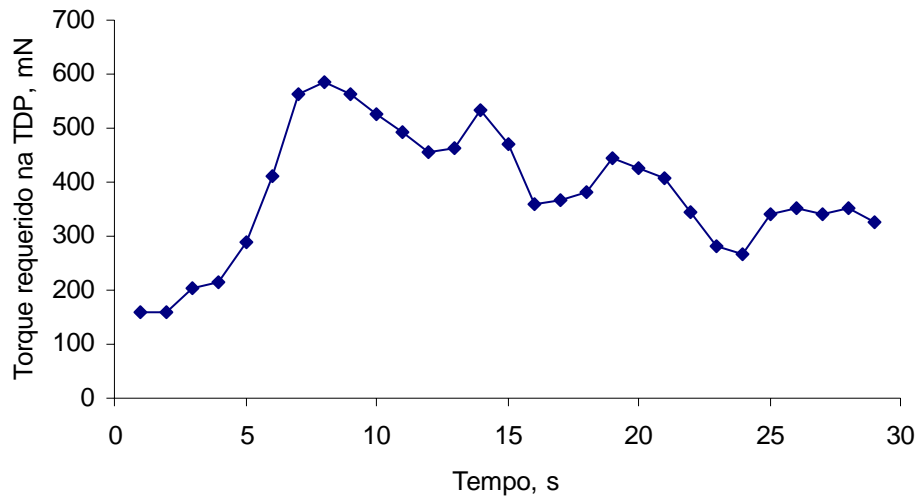


Figura 10 – Variação do torque requerido na TDP em função do tempo, durante ensaio com tratamento de 10 linhas na leira, velocidade de 10 km/h e rotação da TDP de 540 rpm.

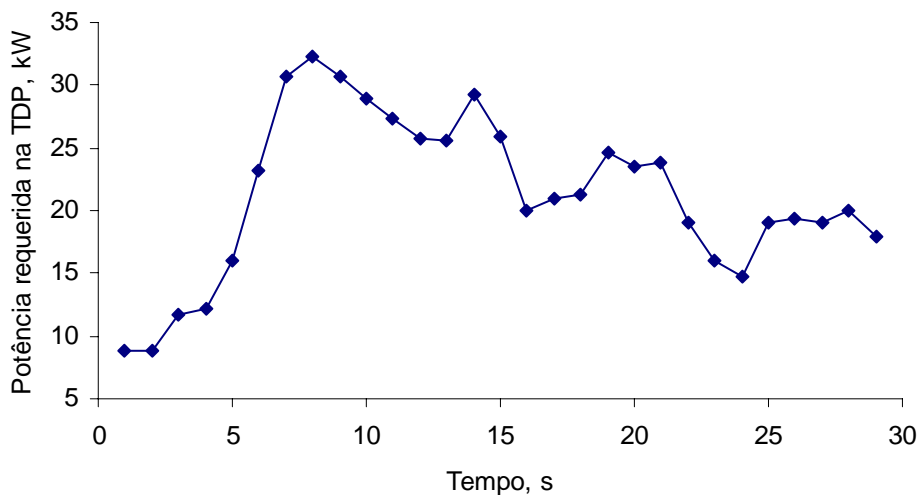


Figura 11 – Variação da potência requerida na TDP em função do tempo, durante ensaio com tratamento de 10 linhas na leira, velocidade de 10 km/h e rotação da TDP de 540 rpm.

Analisando a Figura 8, observa-se uma ligeira queda de taxa de alimentação total estimada dentro da faixa ensaiada, aproximadamente aos 16 s. Este fato pode ser atribuído, em parte, à desuniformidade da leira e, ou à queda instantânea de velocidade de deslocamento do conjunto trator-colhedora de feijão, provocada pelo aumento

repentino da resistência oferecida pelo volume de produto colhido aos órgãos internos da máquina reduzindo a rotação de funcionamento da máquina e do trator.

Analisando a Figura 9, observa-se uma grande variação da rotação do motor, fato ocasionado pela variação constante da taxa de alimentação, em decorrência da variabilidade do material contido em leiras e velocidade de deslocamento.

Já com relação às Figuras 10 e 11, observa-se uma variação de torque e potência requeridos na TDP (Equação 2). Os baixos valores de torque e potência observados decorrem do fato de a colhedora de feijão ter iniciado cada tratamento com seus sistemas de recolhimento, trilha, separação e limpeza, e elevação do produto ao graneleiro vazios. O incremento gradual, atingindo um valor máximo no tratamento, ocorreu devido ao enchimento repentino dos sistemas de beneficiamento do produto colhido pela máquina, à medida que a colhedora de feijão avançava ao longo da leira recolhendo o produto enleirado. Atingido o valor máximo, quando todos os sistemas realizavam suas funções carregados de palhada e grãos, observou-se uma tendência de estabilização e declínio do torque e potência requeridos na TDP até o final do tratamento. Este fato ocorreu devido ao início da descarga do material, que não os grãos, para fora da máquina e da elevação dos grãos beneficiados ao graneleiro, reduzindo, assim, o volume de material presente nos órgãos internos e a resistência oferecida pelo sistema.

O maior valor de torque requerido na TDP, observado durante os ensaios de campo para a rotação de 420 rpm na TDP, foi de 730,84 mN para a condição de 7 linhas na leira e velocidade teórica de 10 km/h, resultando numa potência requerida na TDP de 26,79 kW. Para a rotação de 540 rpm, o maior valor de torque requerido na TDP foi de 907,21 mN, para a condição de 10 linhas na leira e velocidade teórica de 7 km/h, resultando numa potência requerida na TDP de 47,96 kW.

Observou-se que a potência mínima requerida pela colhedora de feijão, declarada pelo fabricante como sendo 88 kW, foi maior que a potência do motor do trator, declarada pelo fabricante como sendo 77,2 kW. Conclui-se que a demanda de potência declarada pelo fabricante da colhedora de feijão está superestimada uma vez que o trator utilizado no ensaio conduziu o experimento sem problemas.

Observou-se neste teste, realizado com tratamento de 10 linhas na leira, velocidade de deslocamento de 10 km/h e rotação da TDP de 540 rpm, força de tração mínima e máxima de 10,07 kN e 20,35 kN, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta os valores médios, mínimos e máximos de torque requerido na TDP das repetições dos ensaios.

Tabela 1 – Valores médios, mínimos e máximos de torque requerido na TDP das repetições dos ensaios

Linhas na leira	Velocidade (km/h)	Rotação (rpm)	Repetição	Torque requerido na TDP (mN)		
				Valor médio	Valor mínimo	Valor máximo
4	4	420	1	257,61	197,66	340,72
4	4	420	2	238,95	204,13	280,54
4	4	420	3	210,62	164,30	233,99
4	7	420	1	179,53	143,99	217,71
4	7	420	2	185,50	170,30	206,03
4	7	420	3	232,84	215,61	242,21
4	10	420	1	161,44	100,03	220,87
4	10	420	2	247,42	190,38	294,51
4	10	420	3	204,43	145,20	257,69
7	4	420	1	280,07	188,39	431,79
7	4	420	2	270,66	231,02	397,14
7	4	420	3	214,14	171,41	273,73
7	7	420	1	277,41	214,45	379,72
7	7	420	2	319,35	263,39	384,33
7	7	420	3	353,00	280,49	467,10
7	10	420	1	336,18	95,28	730,84
7	10	420	2	256,62	183,41	319,27
7	10	420	3	286,51	184,47	365,56
10	4	540	1	289,93	198,06	609,84
10	4	540	2	238,90	127,62	380,12
10	4	540	3	248,98	185,71	354,38
10	7	540	1	404,32	286,31	584,21
10	7	540	2	347,26	195,27	467,20
10	7	540	3	251,42	67,13	457,54
10	10	540	1	362,27	253,59	480,38
10	10	540	2	330,87	218,93	430,76
10	10	540	3	343,14	173,22	467,39
4	4	540	1	271,33	199,94	354,09
4	4	540	2	298,74	248,52	388,02
4	4	540	3	265,88	225,49	305,15
4	7	540	1	243,67	203,93	301,28
4	7	540	2	290,48	225,56	371,96
4	7	540	3	279,35	210,29	331,55
4	10	540	1	195,52	146,97	282,08
4	10	540	2	262,97	191,54	424,23
4	10	540	3	366,29	243,91	500,73
7	4	540	1	255,53	212,64	330,84
7	4	540	2	254,32	207,60	300,92
7	4	540	3	271,93	239,08	339,60
7	7	540	1	258,37	130,42	317,03
7	7	540	2	380,10	210,95	521,11
7	7	540	3	249,90	148,87	301,57
7	10	540	1	477,91	244,92	650,67
7	10	540	2	406,74	203,87	745,96
7	10	540	3	450,31	277,22	666,19
10	4	540	1	308,10	258,10	355,50
10	4	540	2	292,94	102,13	362,51
10	4	540	3	310,78	120,65	419,06
10	7	540	1	343,48	36,46	696,46
10	7	540	2	303,48	118,51	573,74
10	7	540	3	323,21	141,66	615,82
10	10	540	1	413,69	268,11	585,69
10	10	540	2	419,93	200,93	620,89
10	10	540	3	412,69	239,67	593,66

O conjunto trator-colhedora de feijão apresentou, durante os ensaios de campo, uma capacidade de processamento de colheita de grãos de 3,06 t/h, para uma área com produtividade média de 2186,63 kg/ha. A capacidade de processamento encontrada foi considerada boa uma vez que a capacidade de processamento estimada pelo fabricante é de 30 t/dia. Porém, no cálculo deste rendimento, foi considerado apenas o tempo operacional efetivo, não levando em consideração os tempos perdidos com embuchamentos, manobras, descarga do produto colhido, manutenção, dentre outros.

Analisando os dados de perdas ocorridas durante a operação de colheita, observou-se que os valores médios de perdas naturais, somados aos de arranquio e enleiramento, foram inferiores a 0,1%, sendo ignorados por não serem significativos.

A Tabela 2 apresenta os valores médios de perdas ocorridas na plataforma de recolhimento, trilha e separação, e limpeza da colhedora de feijão.

Tabela 2 – Valores médios de perdas ocorridas na plataforma de recolhimento, trilha e separação, e limpeza da colhedora de feijão

Ensaio*	Perdas nos sistemas da colhedora de feijão (kg/ha)		
	Plataforma	Trilha e separação	Limpeza
L4 V4 R420	541,26	50,88	4,69
L4 V4 R540	323,78	163,25	7,93
L4 V7 R420	29,37	42,63	9,59
L4 V7 R540	258,04	85,69	5,33
L4 V10 R420	116,08	28,06	11,64
L4 V10 R540	81,82	32,13	8,55
L7 V4 R420	25,17	58,63	9,43
L7 V4 R540	14,69	25,31	8,76
L7 V7 R420	38,46	56,38	6,52
L7 V7 R540	55,24	69,44	15,53
L7 V10 R420	44,76	56,19	10,22
L7 V10 R540	51,75	39,06	13,88
L10 V4 R420	130,77	91,44	7,59
L10 V4 R540	22,38	70,00	5,38
L10 V7 R420	120,98	146,06	10,11
L10 V7 R540	51,05	77,94	6,95
L10 V10 R420	114,93	72,10	9,00
L10 V10 R540	48,25	132,81	12,82

* L = número de linhas na leira, V = velocidade de deslocamento, R = rotação da TDP.

Analisando os valores médios das perdas ocorridas durante o ensaio da colhedora de feijão, observou-se que, para os sistemas da plataforma de recolhimento, trilha e separação, e limpeza, as perdas encontradas foram de 114,93, 72,11, e 9,11 kg/ha, respectivamente, totalizando cerca de 11,15 % de perdas. Tal valor de perdas é considerado elevado em relação ao nível aceitável, que deve ser entre 3 a 5 %, segundo GRIFFIN (1991), e ocorreu em função da baixa velocidade média de deslocamento,

durante a operação de colheita que, segundo SOUZA (2001 a), afeta a perda de modo inversamente proporcional, para um mesmo número de linhas na leira, e em função da baixa umidade relativa dos grãos, que, segundo SOUZA (2001 b), afeta a perda na plataforma de modo inversamente proporcional, para uma mesma velocidade de deslocamento. O elevado valor de perda da plataforma proporcionou acréscimo da perda total observada.

CONCLUSÕES

A potência total necessária para o acionamento dos mecanismos de recolhimento, trilha, separação, limpeza e elevação do produto beneficiado ao tanque graneleiro da colhedora de feijão, apresentou comportamento diretamente proporcional ao número de leiras na linha, velocidade de deslocamento e rotação da TDP.

O torque requerido na TDP apresentou-se diretamente proporcional à taxa de alimentação total da colhedora de feijão.

O maior valor de torque requerido na TDP, observado durante os ensaios de campo para a rotação de 420 rpm na TDP, foi de 730,84 mN, para a condição de 7 linhas na leira e velocidade teórica de 10 km/h, resultando numa potência requerida na TDP de 26,79 kW.

O maior valor de torque requerido na TDP, observado durante os ensaios de campo para a rotação de 540 rpm na TDP, foi de 907,21 mN, para a condição de 10 linhas na leira e velocidade teórica de 7 km/h, resultando numa potência requerida na TDP de 47,96 kW.

A demanda de potência da colhedora de feijão declarada pelo fabricante está superestimada.

As forças de tração mínima e máxima observadas no teste, realizado com tratamento de 10 linhas na leira, velocidade de deslocamento de 10 km/h e rotação da TDP de 540 rpm, foram de 1,01 kN e 2,04 kN, respectivamente.

O conjunto trator-colhedora de feijão apresentou, durante os ensaios de campo, uma capacidade de processamento de colheita de grãos de 3,06 t/h, para uma área com produtividade média de 2186,63 kg/ha. A capacidade de processamento observada foi considerada boa pelo fato de considerar apenas o tempo operacional efetivo.

Os valores de perdas naturais, somados àqueles das perdas ocorridas no arranquio e enleiramento, foram inferiores a 0,1%.

Os valores de perdas ocorridas nos sistemas da plataforma de recolhimento, trilha e separação, e limpeza, durante a operação de colheita, foram de 114,93, 72,11 e 9,11 kg/ha, respectivamente, totalizando cerca de 11,15 % de perdas.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Programa Redes Cooperativas de Pesquisa (RECOPE/FINEP), pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

À EMBRAPA Milho e Sorgo e à EPAMIG de Sete Lagoas, pelo suporte na realização de testes experimentais.

Às Indústrias Reunidas Colombo, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOWERS, W. **Machinery management**: how to select machinery to fit the real needs of the managers. 4 ed. Farm Business Management. Moline, IL: Deere & Company Service Publications, 1992. 206 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Companhia Nacional de Abastecimento. **Política Agrícola - SAFRA**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/politica_agricola/safra/avalia.html>. Acesso em : 15 janeiro 2002.

CONTO, A. J., et al. **Aspectos técnicos e econômicos da colheita mecânica e manual do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1980. 14 p. (EMBRAPA-CNPAF. Circular Técnica, 02).

GREEN, M. K.; STOUT, B. A.; SEARCY, S. W. Instrumentation package for monitoring tractor performance. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 2, p. 346. 1985.

GRIFFIN, G. A. **Combine harvesting**: operating maintaining and improving efficiency of combines. 4 ed. Fundamentals of Machine Operation. Moline, IL: Deere & Company Service Publications, 1991. 207 p.

MIALHE, L. G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Ed. Ceres, 1974. 301 p.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios e certificação**. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996. 722 p.

ROBLES, C. J. F., et al. Diseño de una máquina cosechadora de fríjol. **Memoria del Congreso Nacional**. Asociación Mexicana de Ingeniería Agrícola, v. 7, p. 99. 1997.

SILVA, C. C. da, et al. **Colheita mecanizada do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1994. 27 p. (EMBRAPA-CNPAP. Boletim de pesquisa, 8).

SOUZA, C. M. A. de. **Avaliação e simulação do desempenho de uma colhedora de fluxo axial para feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2001. 113 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOUZA, L. H. de. **Avaliação do desempenho de uma recolhedora-trilhadora de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) na Zona da Mata de Minas Gerais**. 2001. 58 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P. **Engineering principles of agricultural machines**. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1993. 601 p.

ZIMMERMANN, M. J. O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. 589 p.

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM CONJUNTO TRATOR-COLHEDORA DE FEIJÃO

RESUMO

No Brasil, a colheita mecanizada do feijão é realizada em duas etapas. Na primeira etapa, o produto é arrancado e enleirado, manualmente, e na segunda etapa o produto é colhido, trilhado e limpo, usando-se uma colhedora de feijão, geralmente, puxada por um trator. O aprimoramento do projeto destas máquinas tem sido realizado por tentativa e erro. Neste trabalho, é apresentado um modelo de simulação para analisar o comportamento dinâmico de um conjunto trator-colhedora de feijão. O modelo de simulação foi desenvolvido, usando-se o programa de computador ADAMS versão 10.0. Este modelo incluiu a simulação do trator, interação entre solo e pneu, simulação do sistema de transmissão de potência e dos sistemas de trilha e limpeza da colhedora de feijão. Foram modelados o trator, composto por oito corpos rígidos, e a colhedora de feijão, composta por quatro corpos rígidos. A taxa de alimentação de feijão colhida pela colhedora foi calculada, em função do número de linhas enleiradas, distância entre as fileiras, velocidade longitudinal do sistema, produtividade do feijão e da relação, em massa, de palha e grão da cultura. O peso do produto no tanque graneleiro foi obtido, integrando-se a taxa de alimentação do produto à máquina, em função do tempo. Finalmente, foram realizadas análises do comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão, sob três diferentes condições de simulação, a fim de validar o modelo desenvolvido. O modelo de simulação desenvolvido foi validado, observando-se resultados consistentes e boa correlação, sob duas condições de simulação, entre os dados obtidos em testes experimentais desenvolvidos em condições de campo e os valores simulados.

Palavras-chave: Adams, colheita, modelagem.

SIMULATING THE DYNAMIC PERFORMANCE OF A TRACTOR-HARVESTER SYSTEM FOR BEANS

ABSTRACT

In Brazil, beans are generally harvested in two stages. In the first one the product is manually pulled up and in the second stage the product is picked-up, threshed and cleaned using a beans harvester. The harvesters are generally pulled by a tractor. The design optimization of these machines has been done by trial and error. In this paper, a simulation model is presented to analyze the dynamic performance of tractor harvester system for beans. Simulation model was developed using ADAMS version 10.0. The model includes tractor simulation, and a soil/tire interface, a power train and threshing and cleaning systems of the beans harvester. The tractor was modeled as composed by eight rigid bodies, and the bean harvester, by four rigid bodies. The total feeding rate was calculated in function of the number of lines, the distance among the lines, the system travel speed, the crop yield and the material-other-than-grain and grain ratio. The weight of the product in the harvester tank was obtained integrating the feeding rate of the product into the machine in function of the time. Finally, the dynamic performance of the tractor-harvester system for beans was done. The simulation model was validated and their results were consistent showing good correlation, in two field conditions, between the actual and simulated data.

Keywords: Adams, harvest, modeling.

INTRODUÇÃO

O Brasil é considerado, atualmente, grande produtor de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) tanto em produção como em área cultivada, atingindo na safra 2001/2002, segundo previsões da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), 3,26 milhões de toneladas, com área plantada de 4,21 milhões de hectares (BRASIL, 2002).

O hábito de consumo de feijão pela família brasileira, tanto nas cidades como no meio rural, associado à ampla adaptação climática dessa cultura, faz com que esta seja distribuída por todo o território nacional. Sendo considerado uma das espécies de leguminosas mais importantes no País, o feijão representa a principal fonte de proteína

das populações de baixa renda, sendo o mais utilizado na dieta da população como substituto de proteínas animais, além de ser um produto de destacada importância nutricional, econômica e social (ZIMMERMANN et al., 1988).

Durante o ciclo da cultura do feijão, são adotadas práticas que visam à obtenção de um produto final de alto valor comercial. A colheita, etapa final da cultura, se não for bem conduzida, poderá invalidar esforços e insumos aplicados nas fases anteriores, comprometendo a qualidade e a conservação dos grãos (CONTO et al., 1980). Segundo SRIVASTAVA et al. (1993), o objetivo da colheita de grãos é recolhê-los do campo e separá-los do resto do material colhido de maneira oportuna, com o mínimo de perdas, mantendo sua alta qualidade.

O processo completo de colheita do feijão pode ser dividido em arranquio, enleiramento, recolhimento, trilha, separação e limpeza. Os métodos e equipamentos utilizados na colheita dependem da variedade do produto, do método de plantio e das condições climáticas. Dependendo do método empregado, as etapas de colheita podem ser realizadas manualmente, por diferentes máquinas, ou podem ser combinadas em uma única máquina capaz de realizar todas as operações.

Segundo CONTO et al. (1980), a quase totalidade dos agricultores utiliza a prática de colheita manual, que consiste em arrancar as plantas inteiras quando elas encontram-se quase despidas de folhas. As plantas arrancadas permanecem na lavoura para completar o processo de secagem e, em seguida, são transportadas para um terreiro, onde é feita a trilha, utilizando-se bateção manual ou mecânica, ou, então são enleiradas na própria lavoura para recolhimento mecânico.

A colhedora de feijão que recolhe, trilha, separa e limpa os grãos de feijão é acionada e puxada por um trator. Existem algumas indústrias produzindo este tipo de máquina, no Brasil. Essas máquinas são desenvolvidas por tentativa e erro, mas seu projeto pode ser aperfeiçoado, utilizando-se alguma técnica de projeto auxiliado por computador, como a simulação de sistemas mecânicos. Utilizando esta técnica, a máquina é dividida em vários corpos rígidos que são interligados por juntas apropriadas, sendo as equações de movimento obtidas e solucionadas numericamente.

O programa comercial utilizado na simulação de sistemas mecânicos, geralmente, divide o problema nas fases de pré-processamento, análise e pós-processamento (QUEIROZ, 1995). Na fase de pré-processamento, o usuário define os corpos rígidos e suas propriedades, as forças externas aplicadas e a forma pela qual os corpos estão ligados. Na fase de solução, o usuário define o método e seus parâmetros e executa a análise. O programa gera, automaticamente, as equações de movimento e as soluciona.

Na fase de pós-processamento, o usuário pode ver os resultados através da animação do movimento, da plotagem de dados ou da visualização de valores numéricos da simulação.

Diante disso, este trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos:

- usar a técnica de simulação de sistemas mecânicos para desenvolver um modelo de simulação de um conjunto trator-colhedora de feijão, utilizando o programa de computador ADAMS;
- analisar o comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão; e
- validar o modelo de simulação do conjunto trator-colhedora de feijão desenvolvido com base em dados obtidos em testes experimentais desenvolvidos em condições de campo

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Mecanização Agrícola e no Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Um conjunto composto por um trator e uma máquina colhedora de feijão de arrasto foi modelado e seu comportamento dinâmico simulado. Posteriormente, os resultados do modelo desenvolvido foram comparados com os dados obtidos em testes experimentais, realizados em condições de campo utilizando um sistema de aquisição automática de dados, validando o modelo.

O trator utilizado na simulação foi o modelo MF 620 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA), da Massey Ferguson. Este trator apresenta as seguintes características, segundo o fabricante:

- | | |
|--|-------------------|
| - potência do motor, na rotação nominal (2200 rpm) | 77,2 kW (105 cv) |
| - potência máxima na TDP | 68,8 kW (93,5 cv) |
| - torque máximo no motor @ 1400 rpm | 402 mN (41 mkgf) |
| - peso máximo com lastro | 6000 kg |
| - carga sobre o eixo dianteiro (condição estática) | 36 % |
| - carga sobre o eixo traseiro (condição estática) | 64 % |
| - pneus dianteiros | R1 14,9-24 |
| - pneus traseiros | R1 18,4-34 |

A colhedora de feijão utilizada na simulação foi a Double Master, produzida pelas Indústrias Reunidas Colombo Ltda. Esta colhedora é uma máquina do tipo de arrasto, que trabalha acoplada à barra de tração do trator e possui um eixo com duas rodas de sustentação. A tomada de potência do trator é utilizada para fornecer potência aos sistemas de alimentação, trilha, separação, limpeza e transporte do produto ao tanque graneleiro.

Esta máquina apresenta as seguintes características técnicas, segundo o fabricante:

- tração e acionamento	trator
- potência mínima do trator para acionamento	88 kW (120 cv)
- rotação nominal de trabalho	540 rpm
- largura total	2,45 m
- bitola	2,12 m
- altura	3,25 m
- comprimento	6,30 m
- peso total (graneleiro vazio)	3350 kg
- capacidade de produção (estimada)	até 30 t/dia
- pneus	R1 12,4-24

A máquina colhedora de feijão recebe potência de uma árvore cardam, fornecida pela tomada de potência (TDP) do trator em que a máquina está acoplada. Por meio de engrenagens, correntes, polias, correias e embreagens, os mecanismos internos são acionados com sincronismo. A árvore da TDP transmite torque ao rolo recolhedor de feijão, à esteira transportadora de feijão e ao rolo compressor, mecanismos responsáveis por elevar o produto à entrada do cilindro trilhador. A árvore da TDP transmite torque também para o acionamento da peneira vibratória, responsável pela separação dos grãos secos das vagens verdes e outras impurezas, e transmite torque diretamente ao cilindro trilhador, responsável pela separação dos grãos das vagens. A sucção da palha restante do cilindro trilhador e de pequenas impurezas presentes no final da peneira vibratória é promovida pelo ventilador, que é acionado pela árvore que aciona o próprio cilindro trilhador. O cilindro trilhador também transmite torque necessário para o acionamento da rosca sem-fim de ensaque e do elevador de grãos, responsáveis pela condução dos grãos limpos à caçamba de armazenamento de grãos (Figuras 1 e 2).

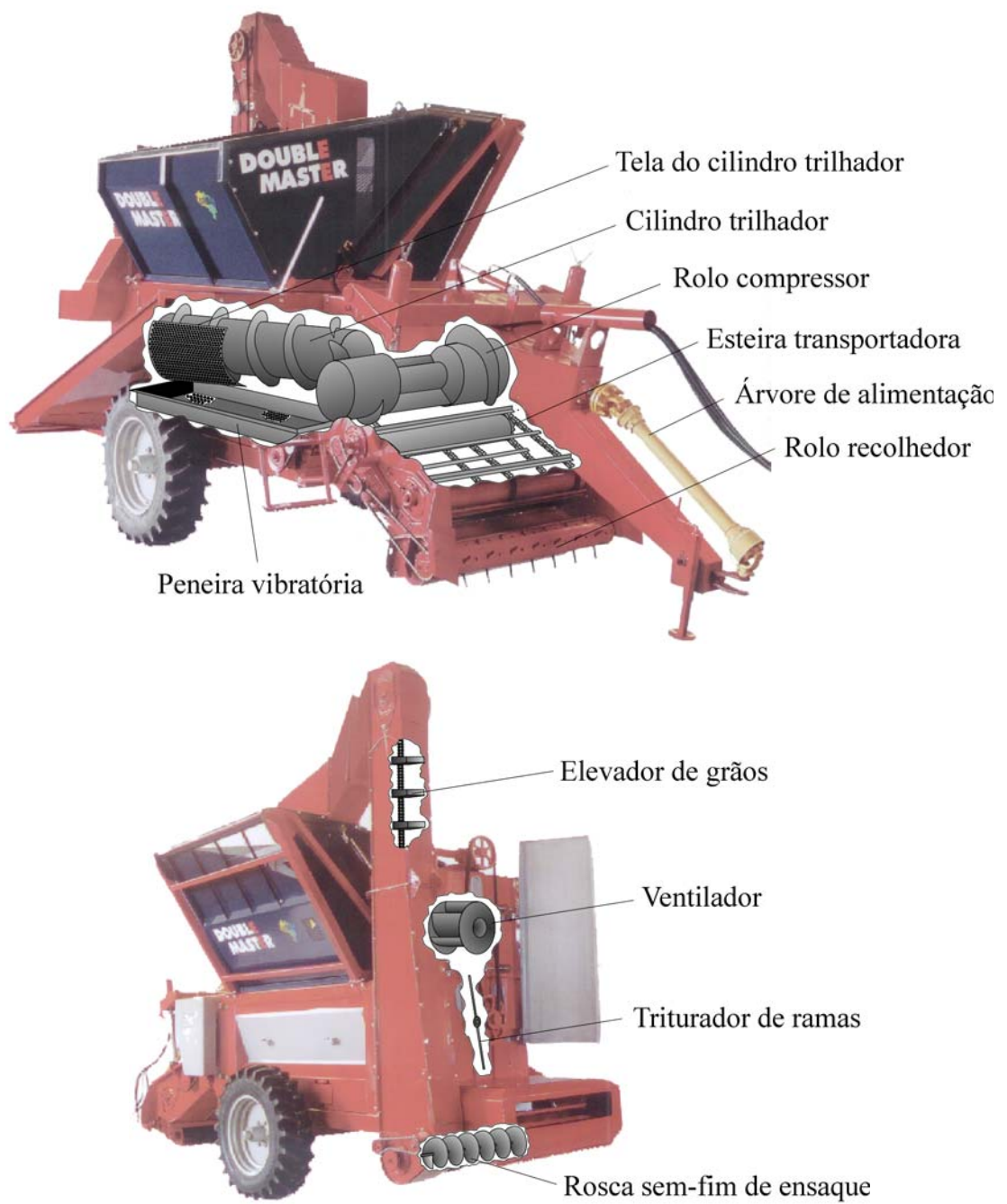


Figura 1 – Principais mecanismos da colhedora de feijão Double Master.

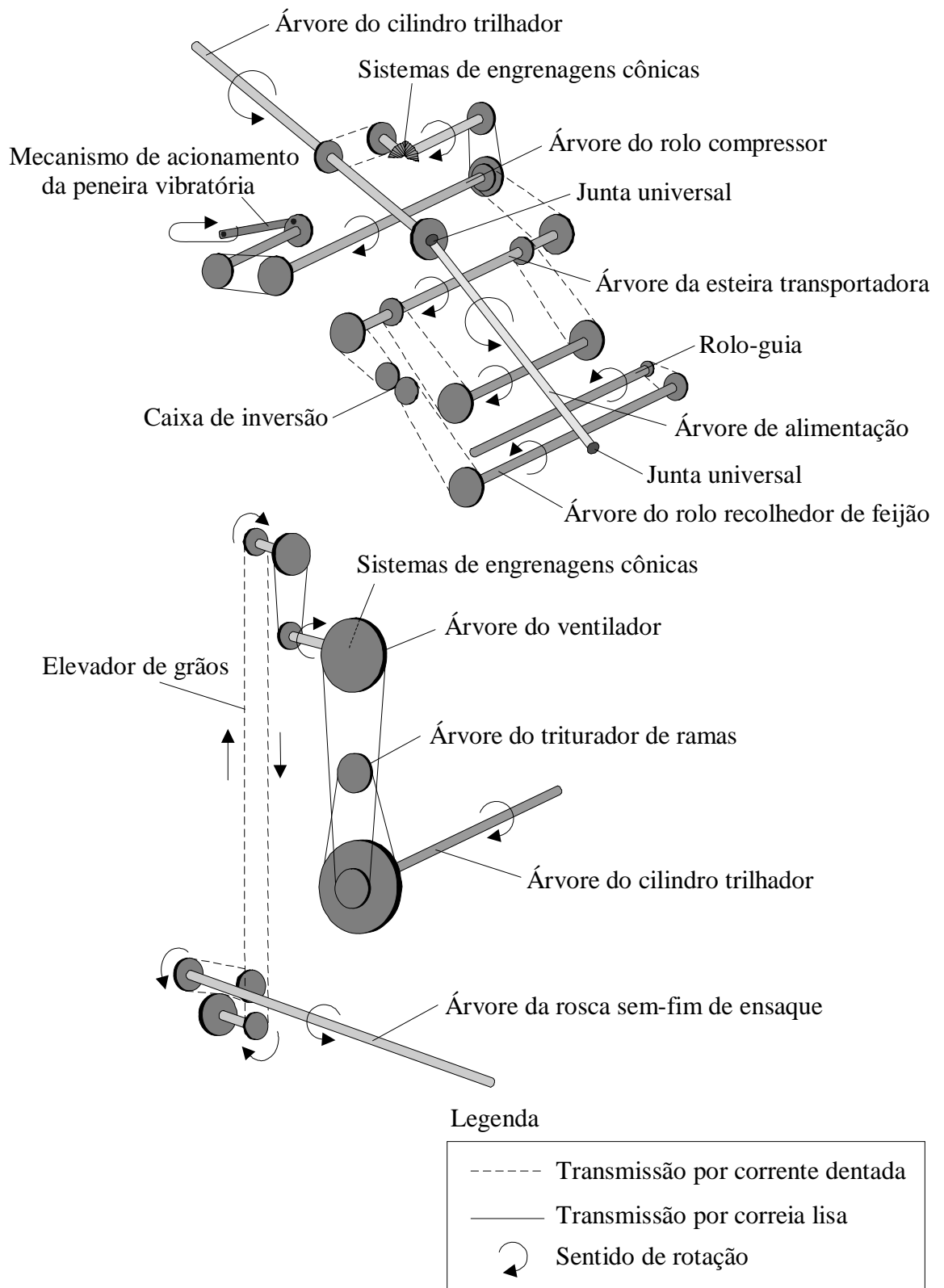


Figura 2 – Esquema de transmissão de potência aos mecanismos da colhedora de feijão Double Master.

Simulação de sistemas mecânicos

O programa ADAMS versão 10.0, baseado na técnica de simulação de sistemas mecânicos, foi utilizado para o desenvolvimento do modelo de simulação do conjunto trator-colhedora de feijão. O programa ADAMS gera um sistema de equações de movimento, usando a equação de Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial \Phi_i}{\partial q_j} = F_j \quad \text{eq. 1}$$

$$\Phi_i = 0 \quad \text{eq. 2}$$

em que

t = tempo, s;

L = Lagrangiano ($T - V$), J;

T = energia cinética, J;

V = energia potencial, J;

q = coordenadas generalizadas dos corpos do sistema, m;

Φ = equações de restrição;

λ = forças de reação devido às restrições, N;

F = forças externas aplicadas, N;

$i = 1, \dots, m$, m representa o número de equações de restrição; e

$j = 1, \dots, k$, k representa o número de graus de liberdade do sistema.

As Equações 1 e 2, juntamente com as equações de restrição de movimento dos componentes do sistema mecânico, podem ser representadas como:

$$\begin{bmatrix} \Sigma F \\ \Phi \end{bmatrix} = [0] \quad \text{eq. 3}$$

em que

$$\Sigma F = f(\ddot{q}, \dot{q}, q, \lambda, t); \text{ e}$$

$$\Phi = f(\dot{q}, q, t).$$

Os termos de segunda ordem da Equação 3 são reduzidos para primeira ordem através da introdução de uma nova variável dependente, ou $\dot{q} - u$, e a Equação 3 se torna:

$$\begin{bmatrix} \Sigma F \\ \dot{q} - u \\ \Phi \end{bmatrix} = [0] \quad \text{eq. 4}$$

em que

$$u = \text{velocidades generalizadas dos corpos do sistema, m/s; e}$$

$$\Sigma F = f(\dot{u}, \dot{q}, q, \lambda, t).$$

O termo ΣF inclui componentes, que podem ser subdivididos nas seguintes categorias:

termos inerciais -	$M(q, u, t)\dot{u}$
termos rotacionais -	$C(q, u, t)$
forças externas -	$F(q, \dot{u}, u, t)$
forças de restrição -	$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial q}\right)^t \lambda$

em que

$$M = \text{momento de inércia e massas dos corpos, Nms}^2; \text{ e}$$

$$C = \text{momento atuante nos componentes do sistema, Nms}^2.$$

Este sistema de equações (Equação 4), quando aplicado à simulação de sistemas mecânicos, é não-linear e somente pode ser integrado numericamente (McGRATH, 1994). O sistema de equações é rígido, o que significa que a solução contém componentes de altas e baixas frequências simultaneamente. Geralmente, para resolver este sistema de equações, é utilizado o método da fórmula de diferenciação retroativa (*backwards differentiation formulas*) com um integrador robusto (*stiff integrator*), ou o método de partição de coordenadas para reduzir o número de equações a serem resolvidas e, então, usar o processo de integração de passos múltiplos (*multi-step integrator*).

Modelo matemático para simulação da dinâmica do trator

O modelo do trator foi composto por 8 corpos rígidos: a) chassi, que representa a estrutura principal do trator; b) roda traseira direita, conectada ao chassi por meio de uma junta de revolução; c) roda traseira esquerda, conectada ao chassi por meio de uma junta de revolução; d) eixo dianteiro, conectado ao chassi por meio de uma junta de revolução; e) elemento de ligação entre o eixo dianteiro e a roda dianteira direita; f) elemento de ligação entre o eixo dianteiro e a roda dianteira esquerda; g) roda dianteira direita, conectada ao elemento de ligação por meio de uma junta de revolução; e h) roda dianteira esquerda, conectada ao elemento de ligação por meio de uma junta de revolução.

A força atuante em cada roda foi representada por um vetor de três componentes, um na longitudinal, outro na vertical e outro na direção lateral da roda. O componente da força longitudinal foi calculado de acordo com ASAE (1990). Para as rodas traseiras e dianteiras, a força longitudinal foi calculada, empregando-se as Equações 5 e 6, respectivamente.

$$F_{xt} = 0,75 W \left(1 - e^{-0,3 C_n S}\right) - W \left(\frac{1,2}{C_n} + 0,04\right) \quad \text{eq. 5}$$

$$F_{xd} = -W \left(\frac{1,2}{C_n} + 0,04\right) \quad \text{eq. 6}$$

em que

F_{xt} = componente de força longitudinal da roda traseira, N;

F_{xd} = componente de força longitudinal da roda traseira, N;

W = carga dinâmica atuando sobre o pneu, N;

C_n = coeficiente do pneu, adimensional; e

S = patinação do pneu, decimal.

O coeficiente do pneu C_n foi calculado de acordo com a equação

$$C_n = \frac{CI b d}{W} \quad \text{eq. 7}$$

em que

CI = índice de cone do solo, Pa;

b = largura do pneu, m; e

d = diâmetro externo do pneu em situação indeformada, m.

A simulação foi realizada, considerando-se o índice de cone do solo de 830 kPa, segundo ASAE (1990), que corresponde à condição de solo firme.

O componente vertical foi representado por uma força do tipo mola-amortecedor (Equação 8), considerando-se a força nula quando não havia contato entre a roda e o solo.

$$F_z = K Z + C V_z \quad \text{eq. 8}$$

em que

F_z = componente de força vertical, N;

K = constante da mola, N/m

Z = coordenada vertical, m;

C = coeficiente de amortecimento, Ns/m; e

V_z = velocidade vertical, m/s

A constante da mola foi considerada como sendo (LINES e MURPHY, 1991):

$$K = 172 - 1,77 R + 5,6 A + 0,34 W R P \quad \text{eq. 9}$$

em que

R = largura do pneu, pol;

A = idade do pneu, anos;

W = diâmetro do pneu, pol; e

P = pressão de trabalho do pneu, bar.

Em todas as simulações, o valor da variável A foi considerado zero. Os valores das variáveis R e W foram considerados para a roda dianteira do tipo 14,9 R 24 e para a roda traseira do tipo 18,4 R 34.

O coeficiente de amortecimento, considerado de acordo com CROLLA et al. (1990), foi 4,3 kNs/m para os pneus dianteiros e 3,5 kNs/m para os pneus traseiros.

A força lateral foi calculada por meio da equação apresentada por CROLLA e SPENCER (1984):

$$F_y = k W \quad \text{eq. 10}$$

em que

F_y = componente de força lateral, N; e

k = constante de proporcionalidade relativa à carga dinâmica e força lateral.

O valor de k foi estimado, empregando-se a seguinte equação:

$$k = -\frac{\alpha}{|\alpha|} \left[a \left(1 - e^{-b|\alpha|} \right) \right] \quad \text{eq. 11}$$

em que

α = ângulo entre a direção longitudinal da roda e em direção que ela move, graus; e

a e b = coeficientes relativos à interação solo-pneu, adimensionais.

A simulação foi realizada, considerando-se $a = 0,75$ e $b = 4$.

Dois equações foram desenvolvidas, a partir do ensaio do motor (QUILLFELDT, 2001), para estimar o torque do motor em função da velocidade angular do motor à máxima aceleração, ou

$$T = 120,29 + 3,5219 \omega - 0,0113 \omega^2, \quad \text{eq. 12}$$

para $\omega < 230,4$

$$T = -732765,3552 + 6355,4187 \omega - 13,7742 \omega^2, \quad \text{eq. 13}$$

para $\omega \geq 230,4$

em que

T = torque axial do motor, mN; e

ω = velocidade angular do motor, rad/s.

Estas duas equações são contínuas e têm o mesmo valor de torque, em função da velocidade angular no ponto de velocidade angular do motor de 230,4 rad/s.

A relação de transmissão entre motor e rodas traseiras, segundo MASSEY FERGUSON (2001), foi 294, 248, 193, 143, 112, 84, 75, 58, 45, 35, 27 e 20 para a primeira até à décima-segunda marchas, respectivamente. A eficiência mecânica entre o motor e as rodas traseiras foi considerada como 0,85, segundo ASAE (1990).

O modelo do trator foi utilizado para simular seu raio de giro. Para isto, a trajetória do trator foi simulada, sob condição de máxima curvatura, ou seja, com a roda-guia totalmente virada, usando-se a bitola máxima e mínima. A simulação foi realizada sem nenhum lastro.

Modelo matemático para simulação da dinâmica da colhedora de feijão

O modelo da colhedora de feijão desenvolvido consiste de 4 corpos rígidos: a) o chassi da colhedora que é conectado ao chassi do trator, na posição da barra de tração usando-se uma junta esférica; b) as rodas da colhedora que são conectadas ao chassi da colhedora por meio de juntas de revolução; c) a plataforma de recolhimento da colhedora, que é conectada ao chassi da colhedora por meio de uma junta de revolução; e d) o tanque graneleiro da colhedora, que é conectado ao chassi da colhedora por meio de uma junta de revolução.

Uma força resultante especificada pela sua intensidade e sentido foi usada para simular o atuador hidráulico responsável por descarregar o tanque graneleiro. No fundo do tanque, uma força do tipo de impacto foi aplicada, simulando-se a força que atua somente quando há contato entre o fundo do tanque e o chassi da colhedora de feijão.

As forças que atuam nas rodas da colhedora de feijão foram simuladas de forma similar às forças atuantes nas rodas dianteiras do trator.

A plataforma de recolhimento da colhedora de feijão foi suportada por uma roda rígida e uma força do tipo de impacto foi aplicada, simulando-se o contato entre a roda rígida e o solo. Duas molas localizadas entre a plataforma e o chassi da colhedora de feijão forçaram a plataforma a permanecer abaixada em contato com o solo.

A taxa de alimentação total (palhas e grãos) colhida pela colhedora de feijão foi calculada, em função do número de linhas enleiradas, espaçamento entre as fileiras, velocidade longitudinal do sistema, produtividade do feijão e da relação, em massa, de palha e grão da cultura (Equação 14).

$$q = \frac{P_a n e v (1 + x)}{10000} \quad \text{eq. 14}$$

em que

q = taxa de alimentação total da colhedora de feijão, kg/s;

P_a = produtividade média de toda área colhida, kg/ha;

n = número de linhas enleiradas, adimensional;

e = espaçamento entre fileiras, m;

v = velocidade de deslocamento, m/s; e

x = relação, em massa, de palha e grão, adimensional.

O peso do produto no tanque graneleiro foi obtido, integrando-se a taxa de alimentação do produto à máquina, em função do tempo. Uma força resultante especificada pela sua intensidade e sentido foi aplicada no centro de gravidade do tanque, representando o produto no tanque.

A potência disponível na tomada de potência foi calculada, segundo a Equação 15 proposta por ASAE (1990), para predição da demanda de potência requerida na TDP para uma colhedora de soja e grãos pequenos, com umidade de palhada de 20% de base úmida.

$$P = 7,5 + 7,5q \quad \text{eq. 15}$$

em que

P = potência requerida na TDP pela colhedora, kW; e

q = taxa de alimentação total da colhedora, kg/s.

Um esquema do conjunto trator-colhedora de feijão, gerado pelo programa ADAMS, é mostrado na Figura 3.

No modelo de simulação desenvolvido, considerou-se, como parâmetro de entrada, a marcha escolhida para a realização do trabalho. Baseado na curva característica de torque e potência em função da rotação do motor (QUILLFELDT, 2001), nas relações de transmissão do motor para a TDP e do motor para o sistema de rodado do trator MF 620 4x2 TDA (MASSEY FERGUSON, 2001), o modelo simulou a taxa de alimentação, o torque e potência requeridos na TDP, a rotação da TDP e a velocidade de deslocamento.

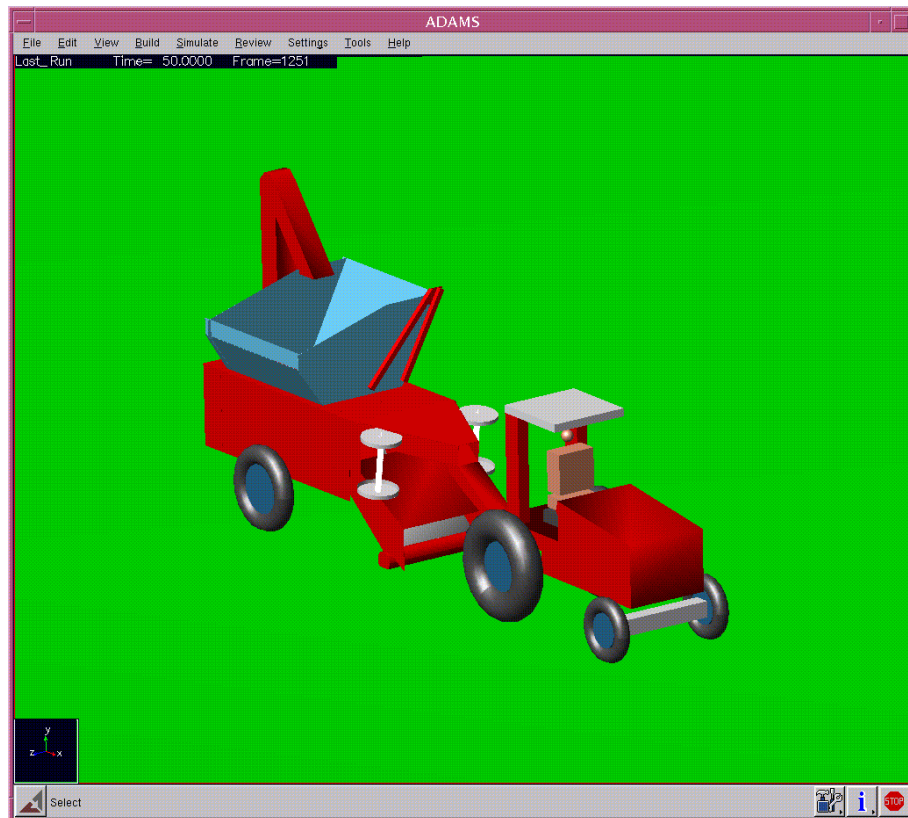


Figura 3 – Esquema do conjunto trator-colhedora de feijão desenvolvido, utilizando-se o programa ADAMS.

O modelo do conjunto trator-colhedora de feijão foi submetido a três diferentes condições de simulação. Na primeira condição simulada, a taxa de alimentação total foi calculada, utilizando-se o número de linhas da leira colhida na área experimental, a produtividade da área experimental, a curva característica de torque e potência do motor, a relação de transmissão do motor, a marcha de trabalho utilizada experimentalmente e a relação, em massa, de palha e grão. Em função da variação da taxa de alimentação simulada, o modelo desenvolvido simulou o comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão.

Na segunda condição simulada, utilizou-se a taxa de alimentação total estimada a partir de dados experimentais como dados de entrada da taxa de alimentação simulada, interpolando os valores intermediários. Os demais parâmetros simulados foram calculados, conforme a primeira condição simulada.

Na terceira condição simulada, utilizou-se, para cálculo da taxa de alimentação total, uma função senoidal, considerando como dados de entrada a taxa de alimentação total estimada a partir de dados experimentais e o tempo. Os demais parâmetros simulados foram calculados, conforme os modelos anteriores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo do trator foi utilizado para simular seu raio de giro. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1. Os valores simulados foram comparados aos dados experimentais, obtidos no teste do trator (MASSEY FERGUSON, 2001). Nota-se que o erro máximo, na predição do raio de giro, foi de 1,82% (Tabela 1). As Figuras 4 e 5 apresentam as vistas superiores das trajetórias do centro de gravidade do trator, quando este manobra com as rodas viradas no ângulo máximo para a esquerda e para a direita, respectivamente. A simulação foi obtida, considerando-se que, nos primeiros 10 s, o trator segue em direção reta e, então, inicia a manobra de giro, gastando um tempo total de 25 s de simulação.

Tabela 1 – Comparação entre os raios de giro experimental e o simulado

Variáveis	Teste desenvolvido	
	1	2
Direção de giro	Esquerda	Direita
Bitola (m)	2,19	2,19
Ângulo de giro da roda esquerda (°)	47,16	34,92
Ângulo de giro da roda direita (°)	34,92	47,16
Raio de giro experimental (m)	4,33	4,40
Raio de giro simulado (m)	4,40	4,48
Erro absoluto do resultado simulado (%)	1,62	1,82

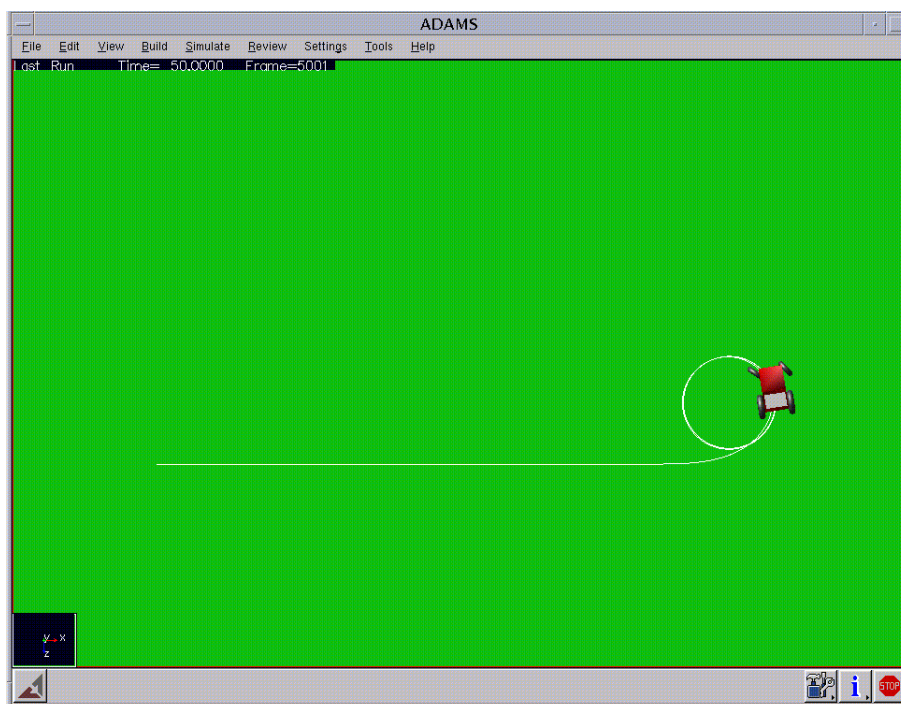


Figura 4 – Vista superior da trajetória do centro de gravidade do trator realizando curva para a esquerda.

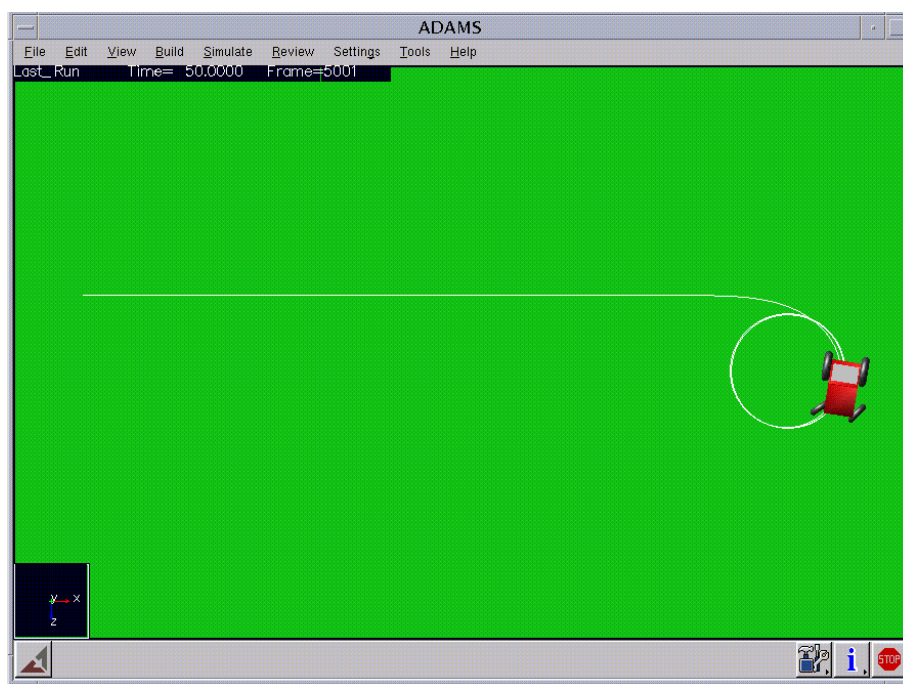


Figura 5 – Vista superior da trajetória do centro de gravidade do trator realizando curva para a direita.

Validação do modelo do conjunto trator-colhedora de feijão desenvolvido

No modelo de simulação desenvolvido, considerou-se, como parâmetro de entrada, a marcha escolhida para a realização do trabalho. Baseado na curva característica de torque e potência em função da rotação do motor (QUILLFELDT, 2001), nas relações de transmissão do motor para a TDP e do motor para o sistema de rodado do trator MF 620 4x2 TDA (MASSEY FERGUSON, 2001), o modelo simulou a taxa de alimentação, o torque e potência requeridos na TDP, a rotação da TDP e a velocidade de deslocamento.

As comparações dos valores simulados pelo programa ADAMS, sob três diferentes condições de simulação, e dos valores experimentais da variação da velocidade de deslocamento, da taxa de alimentação estimada, da rotação da TDP, do torque e da potência requeridos na TDP, em função do tempo, são apresentadas a seguir.

Na primeira condição simulada, apresentada nas Figuras 6, 7, 8, 9 e 10, a taxa de alimentação total foi calculada, utilizando-se o número de linhas da leira colhida na área experimental, a produtividade da área experimental, a curva característica de torque e potência do motor, a relação de transmissão do motor, a marcha de trabalho utilizada experimentalmente e a relação, em massa, de palha e grão. Em função da variação da

taxa de alimentação simulada, o modelo desenvolvido simulou o comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão.

Na Figura 6, é apresentada a comparação entre as velocidades de deslocamento simulada e experimental. Observa-se que o modelo subestimou os dados experimentais com erro relativo médio de 17,08%. Tal comportamento pode ser atribuído à possibilidade de a taxa de alimentação total simulada ter sido superior à experimental. Este fato ocorreu devido à taxa simulada ter sido calculada em função da produtividade média de toda área colhida, enquanto a taxa experimental foi medida sob condição de menor produtividade. Isto resultou num maior acréscimo da carga resistiva nos mecanismos da colhedora e, conseqüentemente, em maior decréscimo de rotação da TDP simulada.

A Figura 7 apresenta a comparação entre as taxas de alimentação total simulada e estimada a partir de dados experimentais. Observa-se que a taxa de alimentação simulada foi superior àquela estimada a partir dos dados de número de linhas, espaçamento, produtividade e velocidade obtidos, experimentalmente, com erro relativo médio de 13,61%. Tal erro pode ser atribuído ao fato da taxa de a alimentação total simulada ter sido calculada em função da produtividade média de toda área colhida, enquanto a estimada a partir de dados experimentais considerou, apenas, uma determinada parcela experimental em que ocorreu uma produtividade inferior (1,84 t/ha) à média de toda área colhida (2,18 t/ha). A taxa de alimentação total, estimada a partir de dados experimentais, foi determinada em função da variação da velocidade de deslocamento, considerando-se a produtividade da leira colhida constante, ao longo do ensaio, uma vez que a máquina colhedora não dispunha de instrumentos para medir a taxa de alimentação de feijão, em tempo real.

A comparação entre as rotações da TDP simulada e experimental é apresentada na Figura 8. Observa-se que o modelo subestimou os dados experimentais, com erro médio de 5,91%. Tal comportamento pode ser atribuído à possibilidade de a taxa de alimentação total simulada ter sido superior à experimental, o que resultou em maior acréscimo de carga resistiva nos mecanismos da colhedora e, conseqüentemente, em maior decréscimo de rotação da TDP simulada, em relação aos valores experimentais observados.

Na Figura 9, é apresentada a comparação entre os torques requeridos na TDP simulado e experimental. Observa-se que o modelo apresentou erro relativo médio de 35,89%. Pode-se observar que o modelo aproximou-se do valor máximo de torque experimental. O modelo gerou valores de torque praticamente constantes, após 5 s,

devido ao fato de a taxa de alimentação simulada ter tido o mesmo comportamento ao longo do ensaio. Observa-se grande variação do torque experimental. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de a leira ter apresentado uma desuniformidade, ao longo do ensaio, diminuindo seu volume de palha e grão no final da leira colhida. Não foi observada relação entre os valores de torque e taxa de alimentação estimada a partir de dados experimentais, pelo fato de o torque observado ser resultante da resistência imposta pela real condição da leira colhida. A taxa de alimentação total estimada a partir de dados experimentais, contudo, foi calculada, desconsiderando-se a real condição da leira colhida. O modelo gerou valores de torque seguindo o comportamento de variação da taxa de alimentação total simulada.

A Figura 10 apresenta a comparação entre as potências requeridas na TDP simulada e experimental. Foi encontrado um erro relativo médio de 25,99%. Observa-se que as potências simulada e experimental acompanharam as variações dos torques simulado e experimental, respectivamente. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de a potência ter sido calculada em função da variação do torque e rotação da TDP.

O elevado erro relativo médio observado, também, pode ser atribuído ao fato de ter sido utilizada, no programa ADAMS, uma equação para predição de potência requerida na TDP para uma colhedora de soja e grãos pequenos, para material de palhada com umidade de 20% de base úmida (Equação 15). A cultura utilizada nos ensaios foi o feijão com umidade média inferior a 20 %. Esta equação foi utilizada pelo fato de ser a única disponível para predição da potência, para cultura semelhante à do feijão, uma vez que este também é uma leguminosa como a soja.

Outro fato que pode ter contribuído para o elevado erro relativo médio foi de ter sido utilizada, na simulação, a taxa de alimentação total estimada a partir da produtividade média de toda a área colhida ao invés da taxa de alimentação total real.

Pode-se observar que todos os gráficos comparativos apresentam os valores simulados partindo do valor zero. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de o trator, que tracionava a colhedora de feijão, ter iniciado a simulação com o motor em estado de repouso. Contudo, o ensaio experimental apresenta valores altos, a partir do início, devido ao fato de o conjunto trator-colhedora ter sido colocado em movimento antes de se iniciar a aquisição de dados.

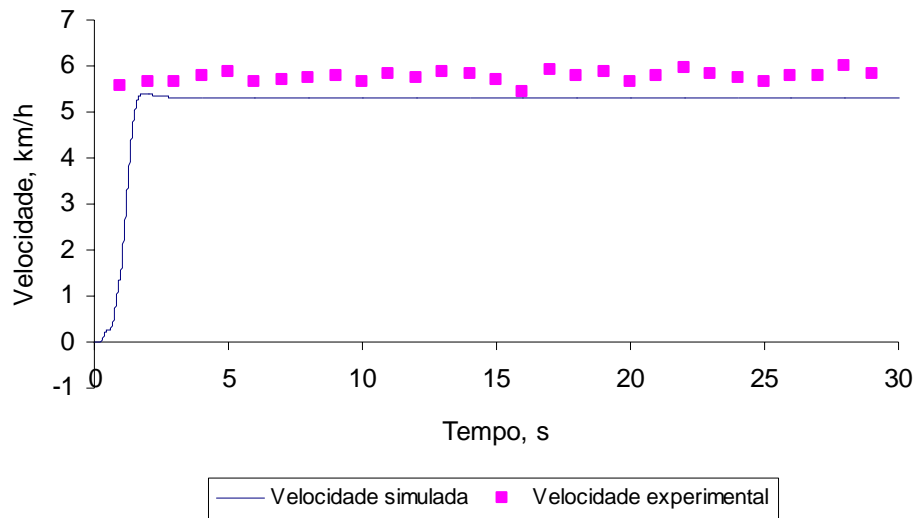


Figura 6 – Comparação entre velocidade de deslocamento simulada pelo programa ADAMS e velocidade obtida experimentalmente.

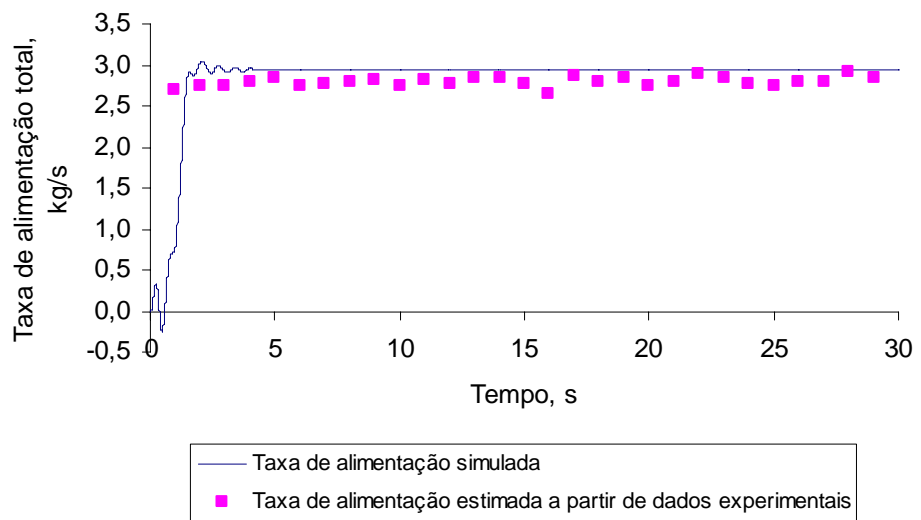


Figura 7 – Comparação entre taxa de alimentação total simulada pelo programa ADAMS e taxa de alimentação total estimada a partir de dados experimentais.

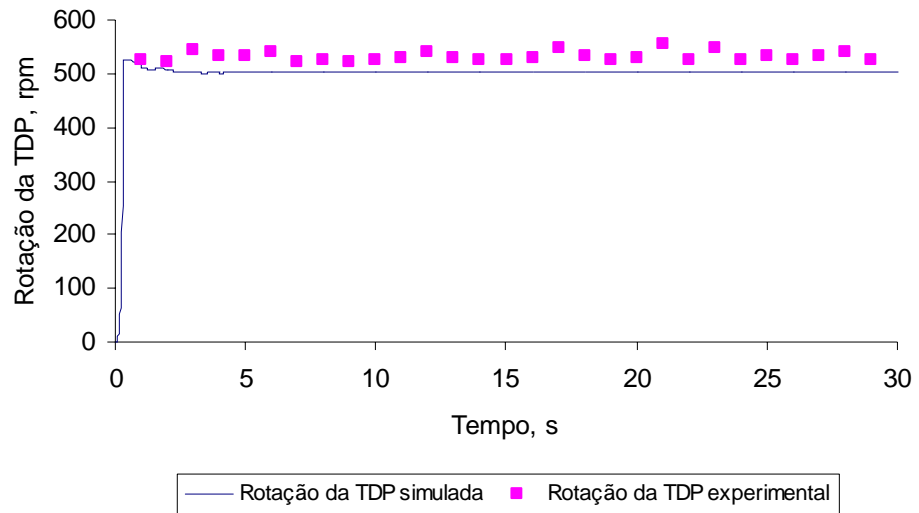


Figura 8 – Comparação entre rotação da TDP simulada pelo programa ADAMS e rotação da TDP obtida experimentalmente.

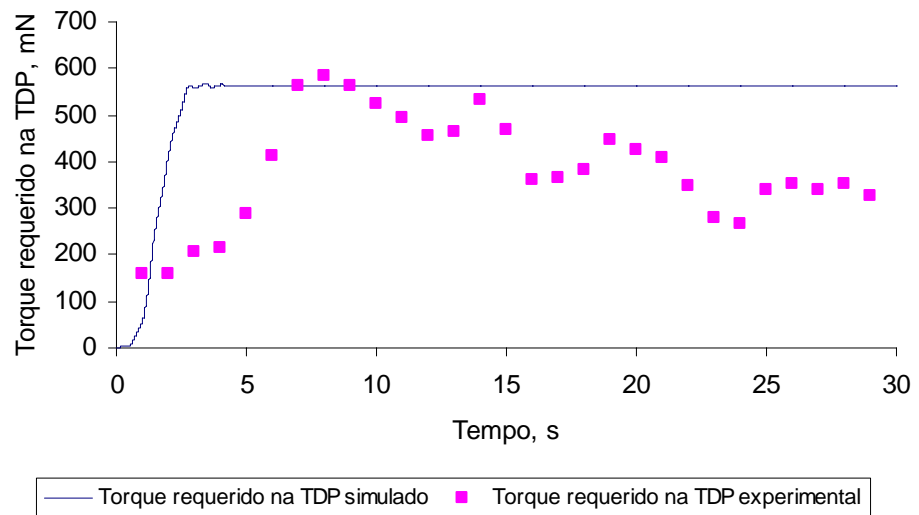


Figura 9 – Comparação entre torque requerido na TDP simulado pelo programa ADAMS e torque requerido na TDP obtido experimentalmente.

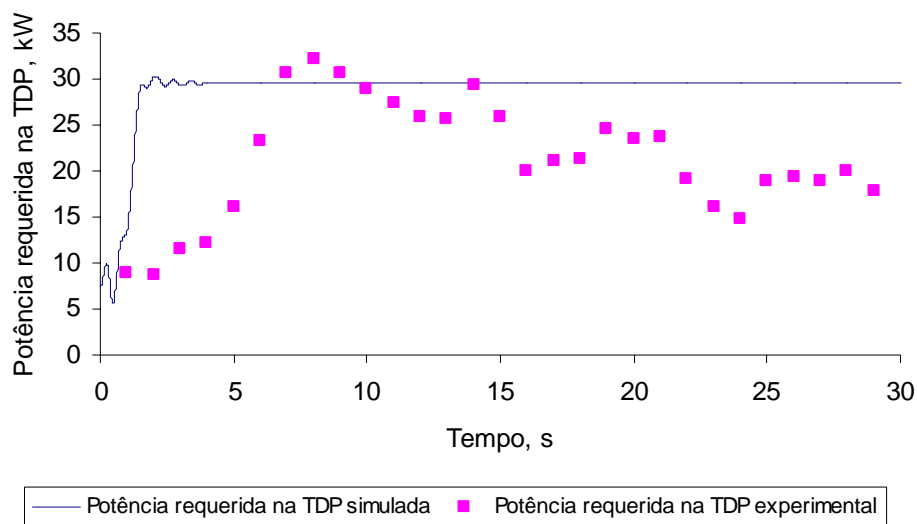


Figura 10 – Comparação entre potência requerida na TDP simulada pelo programa ADAMS e potência requerida na TDP obtida experimentalmente.

Na segunda condição simulada, apresentada nas Figuras 11, 12, 13, 14 e 15, utilizou-se a taxa de alimentação total estimada a partir de dados experimentais como dados de entrada da taxa de alimentação simulada, interpolando os valores intermediários. Os demais parâmetros simulados foram calculados, conforme a primeira condição simulada.

Na Figura 11, é apresentada a comparação entre as velocidades de deslocamento simulada e experimental. Observa-se que o modelo subestimou os dados experimentais, com erro relativo médio de 16,91%. Tal comportamento pode ser atribuído ao fato de a taxa de alimentação total simulada ter sido considerada igual à estimada a partir de dados experimentais. Essa taxa estimada foi determinada, em função da variação da velocidade de deslocamento, considerando-se a produtividade da leira colhida constante ao longo do ensaio, uma vez que a máquina colhedora não dispunha de instrumentos para medir a taxa de alimentação de feijão, em tempo real. Na verdade, a taxa de alimentação total experimental deve ter sido diferente da estimada a partir de dados experimentais e, possivelmente, foi inferior, o que pode ter causado menor resistência nos mecanismos da colhedora, aumentando a rotação do motor e, conseqüentemente, a velocidade de deslocamento experimental, em relação aos valores simulados observados.

A Figura 12 apresenta a comparação entre as taxas de alimentação total simulada e estimada a partir de dados experimentais. Os dados simulados e os calculados de

dados experimentais são iguais, devido ao fato de os valores simulados terem sido considerados como se fossem os calculados sob esta condição de modelagem. Os valores intermediários foram interpolados pelo modelo desenvolvido.

A comparação entre as rotações da TDP simulada e experimental é apresentada na Figura 13. Observa-se que o modelo subestimou os dados experimentais, com erro médio de 5,76%. Tal comportamento pode ser atribuído ao fato de a rotação da TDP simulada ser função da taxa de alimentação total simulada, que foi diferente e, possivelmente, maior que a experimental, o que pode ter causado maior resistência nos mecanismos da colhedora, reduzindo a rotação da TDP simulada em relação aos valores experimentais observados.

Na Figura 14, é apresentada a comparação entre os torques requeridos na TDP simulado e experimental. Observa-se que o modelo apresentou erro relativo médio de 28,88%. Pode-se verificar que o modelo apresentou os valores, variando dentro dos valores de torque experimental. A variação do torque experimental pode ser atribuída à variação da taxa de alimentação total experimental, que era desuniforme. O modelo gerou valores de torque, seguindo o comportamento de variação da taxa de alimentação total simulada.

A Figura 15 apresenta a comparação entre as potências requeridas na TDP simulada e experimental. Foi encontrado um erro relativo médio de 27,68%. Observa-se que as potências simulada e experimental acompanharam as variações de torques simulado e experimental, respectivamente. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de a potência ter sido calculada em função da variação do torque e rotação da TDP.

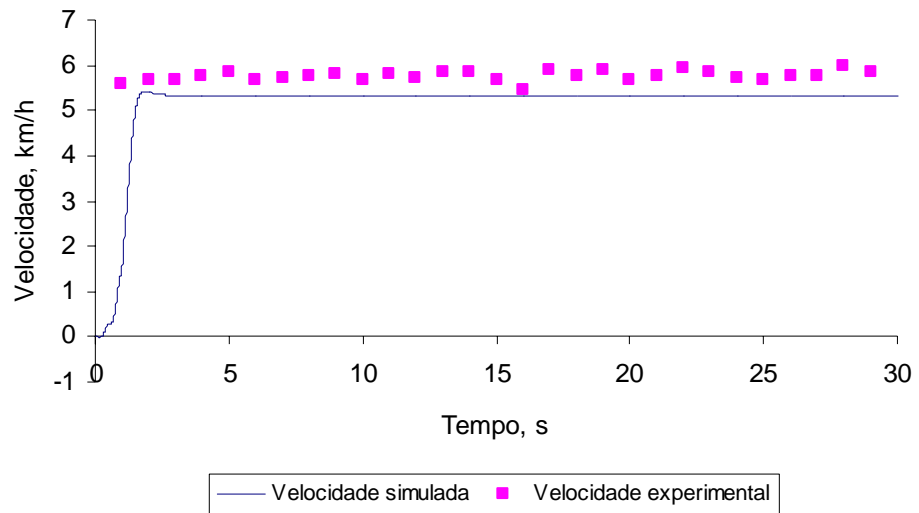


Figura 11 – Comparação entre velocidade simulada pelo programa ADAMS e velocidade obtida experimentalmente.

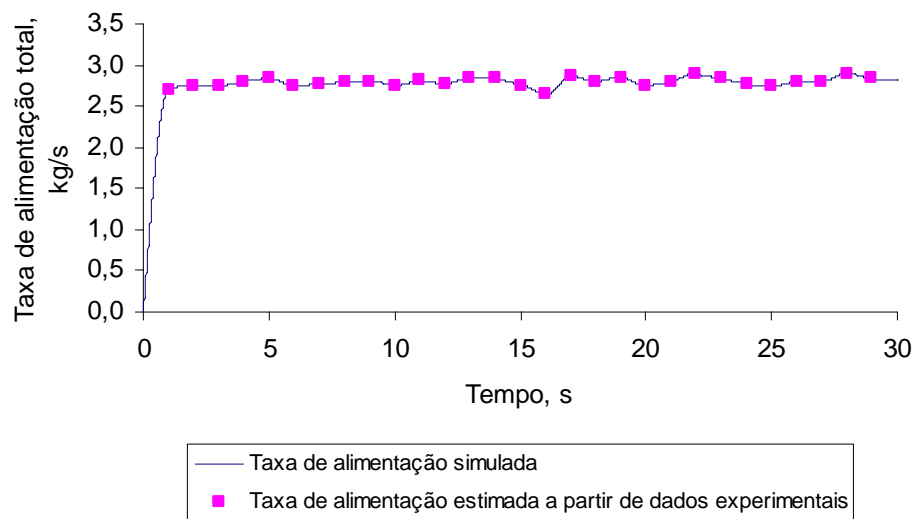


Figura 12 – Comparação entre taxa de alimentação total simulada pelo programa ADAMS e taxa de alimentação total estimada a partir de dados experimentais.

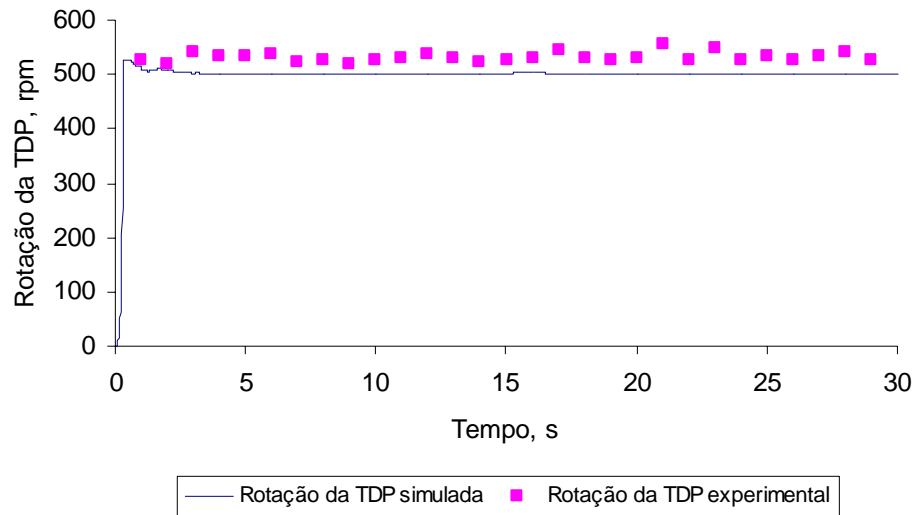


Figura 13 – Comparação entre rotação da TDP simulada pelo programa ADAMS e rotação da TDP obtida experimentalmente.

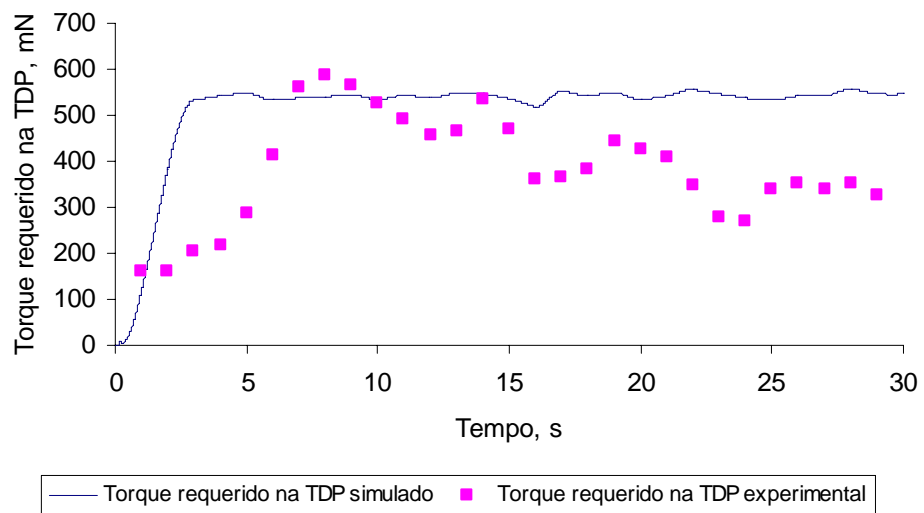


Figura 14 – Comparação entre torque requerido na TDP simulado pelo programa ADAMS e torque requerido na TDP obtido experimentalmente.

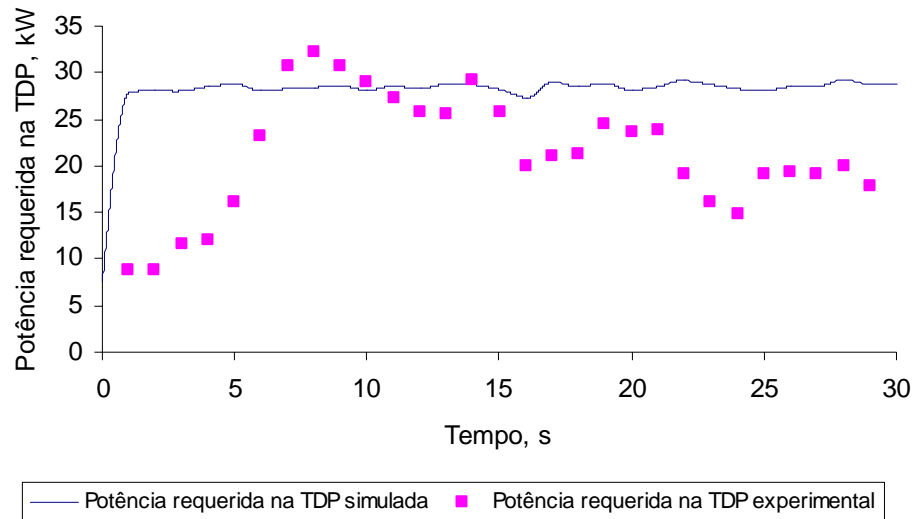


Figura 15 – Comparação entre potência requerida na TDP simulada pelo programa ADAMS e potência requerida na TDP obtida experimentalmente.

Na terceira condição simulada, apresentada nas Figuras 16, 17, 18, 19 e 20, utilizou-se, para cálculo da taxa de alimentação total, uma função senoidal, considerando como dados de entrada a taxa de alimentação total estimada a partir de dados experimentais e o tempo (Equação 16). Os demais parâmetros simulados foram calculados, conforme os modelos anteriores.

$$q_s = \frac{P_a n e v_s (1+x) \left(1 + 0,5 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{4} \right) \right)}{10000} \quad \text{eq. 16}$$

em que

q_s = taxa de alimentação total simulada pelo modelo, kg/s;

v_s = velocidade simulada, m/s; e

t = tempo de simulação, s.

Na Figura 16, é apresentada a comparação entre as velocidades de deslocamento simulada e experimental. Observa-se que o modelo subestimou os dados experimentais, com erro relativo médio de 17,16%. Tal comportamento pode ser atribuído ao fato de a taxa de alimentação simulada ter seguido uma variação senoidal em torno da taxa de alimentação estimada a partir de dados experimentais, o que resultou numa carga resistiva nos mecanismos da colhedora variável de forma senoidal e, conseqüentemente,

numa variação de rotação da TDP acompanhando seu comportamento. O acréscimo e decréscimo da rotação da TDP resultou num acréscimo e decréscimo de rotação do motor, respectivamente, que, por sua vez, determinou o decréscimo e o acréscimo da velocidade de deslocamento simulada, respectivamente, em relação aos valores experimentais observados.

A Figura 17 apresenta a comparação entre as taxas de alimentação total simulada e estimada a partir de dados experimentais. Observa-se que a variação dos dados experimentais estão dentro da faixa dos dados simulados. Foi encontrado um erro relativo médio de 36,93%. Esta variação foi induzida, conforme a Equação 16.

A comparação entre as rotações da TDP simulada e experimental é apresentada na Figura 18. Observa-se que o modelo subestimou os dados experimentais, com erro médio de 5,99%. Tal comportamento pode ser atribuído ao fato da rotação da TDP simulada ser função da taxa de alimentação total simulada. A variação da rotação da TDP simulada acompanhou a variação de forma senoidal da taxa de alimentação total simulada.

Na Figura 19, é apresentada a comparação entre os torques requeridos na TDP simulado e experimental. Observa-se que o modelo apresentou erro relativo médio de 39,52%. O modelo gerou valores de torque seguindo o comportamento de variação da taxa de alimentação total simulada.

A Figura 20 apresenta a comparação entre as potências requeridas na TDP simulada e experimental. Foi encontrado um erro relativo médio de 34,55%. Observa-se que as potências simulada e experimental acompanharam as variações de torques simulado e experimental, respectivamente. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de a potência ter sido calculada em função da variação do torque e rotação da TDP.

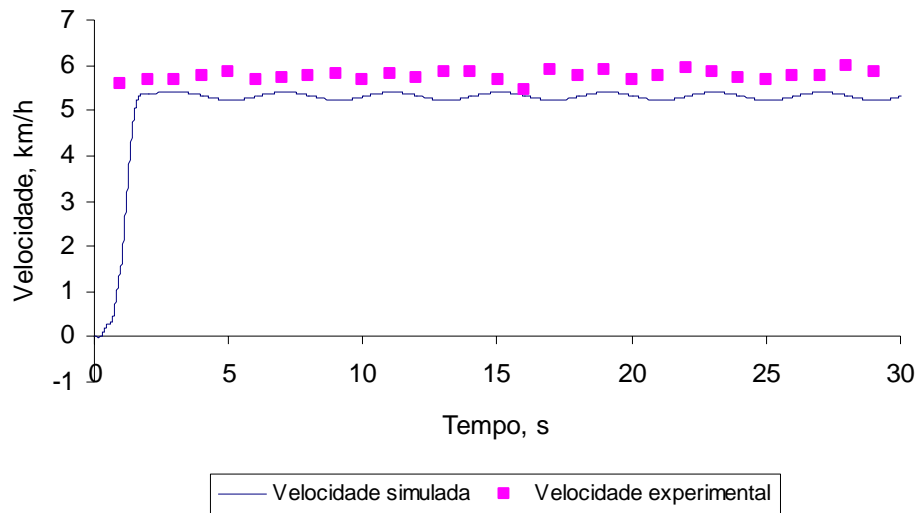


Figura 16 – Comparação entre velocidade simulada pelo programa ADAMS e velocidade obtida experimentalmente.

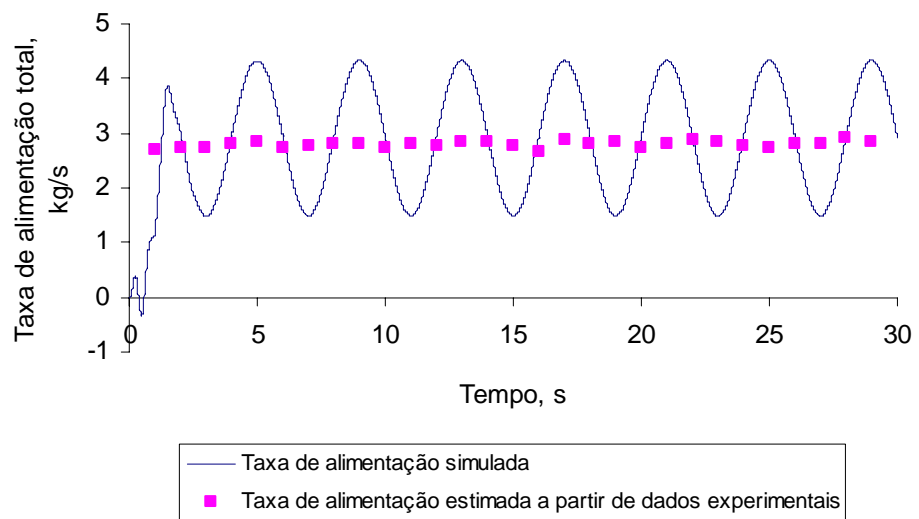


Figura 17 – Comparação entre taxa de alimentação total simulada pelo programa ADAMS e taxa de alimentação total estimada a partir de dados experimentais.

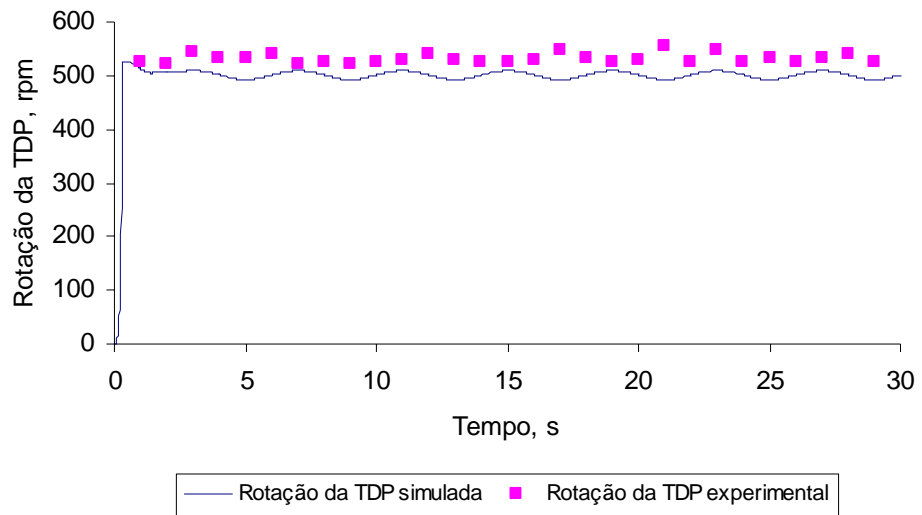


Figura 18 – Comparação entre rotação da TDP simulada pelo programa ADAMS e rotação da TDP obtida experimentalmente.

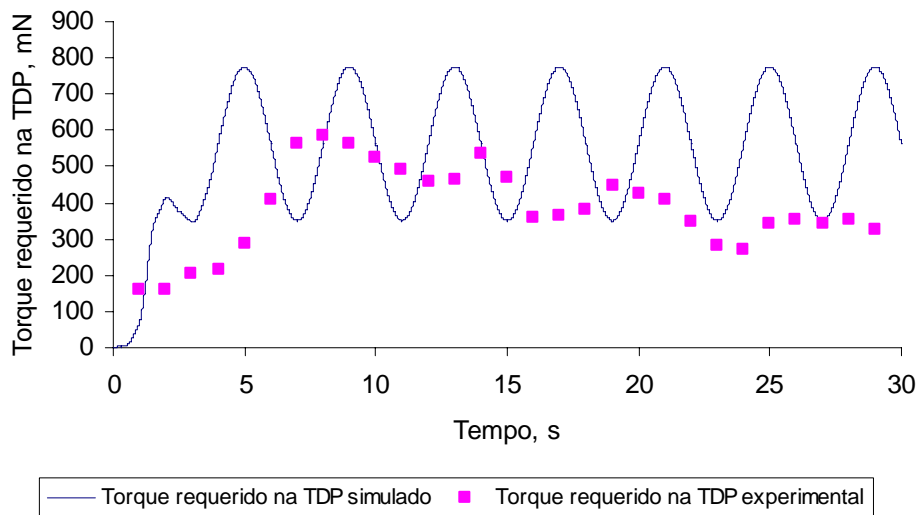


Figura 19 – Comparação entre torque requerido na TDP simulado pelo programa ADAMS e torque requerido na TDP obtido experimentalmente.

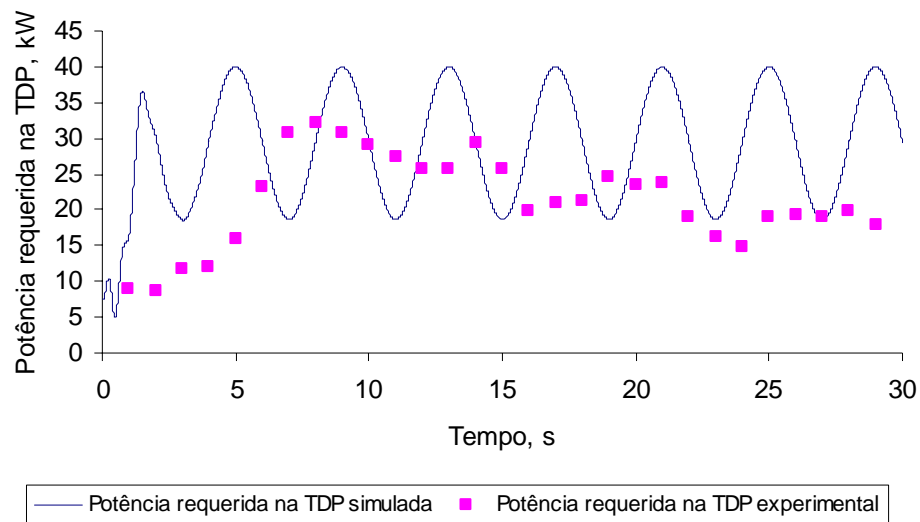


Figura 20 – Comparação entre potência requerida na TDP simulada pelo programa ADAMS e potência requerida na TDP obtida experimentalmente.

CONCLUSÕES

Um modelo matemático para simular o comportamento dinâmico do trator foi desenvolvido e utilizado para simular seu raio de giro observando-se, na comparação dos valores simulados com os dados experimentais, um erro máximo de 1,82%.

Um modelo matemático para simular o comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão foi desenvolvido e utilizado sob três diferentes condições. O modelo de simulação foi validado comparando-se os dados obtidos sob testes experimentais desenvolvidos em condições de campo com os valores obtidos na simulação.

Na primeira condição simulada, em que a taxa de alimentação total simulada foi calculada, utilizando-se o número de linhas, a produtividade da área e características do trator, o modelo simulou melhor a taxa de alimentação total e a potência requerida na TDP observando-se erro relativo médio de 13,61% e 25,99%, respectivamente.

Na segunda condição simulada, em que a taxa de alimentação total simulada foi considerada como sendo a estimada a partir de dados experimentais, o modelo simulou melhor a velocidade de deslocamento, a rotação da TDP e o torque requerido na TDP observando-se erro relativo médio de 16,91%, 5,76% e 28,88%, respectivamente.

Com base nos resultados observados, conclui-se que o modelo de simulação desenvolvido ainda requer alterações e aprimoramento com o objetivo de se reduzir os erros observados.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Programa Redes Cooperativas de Pesquisa (RECOPE/FINEP), pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

À EMBRAPA Milho e Sorgo e à EPAMIG de Sete Lagoas, pelo suporte na realização de testes experimentais.

Às Indústrias Reunidas Colombo, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE. **D497 - Agricultural machinery management data**. In: Standards 1990. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI, p. 285-291. 1990.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Companhia Nacional de Abastecimento. **Política Agrícola - SAFRA**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/politica_agricola/safra/avalia.html>. Acesso em : 15 janeiro 2002.

CONTO, A. J., et al. **Aspectos técnicos e econômicos da colheita mecânica e manual do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*)**. Goiânia, GO: EMBRAPA-CNPAP, 1980. 14 p.

CROLLA, D. A.; SPENCER, H. B. Tractor handling during control loss on slopping ground. **Vehicle system dynamics**, v. 13. p. 1-17. 1984.

CROLLA, D. A.; HORTON, D. N. L.; STAYNER, R. M.; Effect of tire modeling on tractor ride vibration predictions. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 47, p. 55-77. 1990.

KIM, K. U.; HOAG, D. L.; HUNT, D. R. Ride simulation of passive, active, and semi-active seat suspensions for off-road vehicles. **Transactions of the ASAE**, vol. 28, n. 1, p. 56-64. 1985.

LINES, J. A.; MURPHY, K. The stiffness of agricultural tractor tires. **Journal of Terramechanics**, v. 28, n. 1, p. 49-64. 1991.

MASSEY FERGUSON. **MF620**: MF620/4 Especificações técnicas. Disponível em: <<http://www.massey.com.br/portugues/espProduto.asp?idproduto=551&serie=6>>. Acesso em: 28 novembro 2001.

McGRATH, J. F. **Numerical methods in ADAMS**: Advanced ADAMS/Solver course. 1994.

QUILLFELDT, W. **Curva característica do motor P4000T**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <garcia@ufv.br> em 29 novembro 2001.

QUEIROZ, D. M. **Steering performance simulation of rubber-tracked tractor**. 1995. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Purdue University, West Lafayette.

SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P. **Engineering principles of agricultural machines**. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1993. 601 p.

ZIMMERMANN, M. J. O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. 589 p.

CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Mecanização Agrícola e no Laboratório de Visão Artificial e Projeto de Máquinas do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, e na Área Experimental da Epamig e no Laboratório de Automação Agropecuária da Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas, MG.

Este trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos: implementar um sistema de aquisição automática de dados, para ser utilizado na avaliação de máquinas; avaliar o desempenho operacional de um conjunto trator-colhedora de feijão; e usar a técnica de simulação de sistemas mecânicos, para desenvolver um modelo de simulação de um conjunto trator-colhedora de feijão e analisar seu comportamento dinâmico.

O sistema foi implementado, utilizando-se o programa LabVIEW versão 6i e equipamentos da "National Instruments". Foram desenvolvidos Instrumentos Virtuais (VI) para os seguintes tipos sensores: célula de carga, torquímetro, medidor de rotação tipo sensor indutivo, e medidor de velocidade tipo radar.

Na avaliação do desempenho operacional do conjunto trator-colhedora de feijão, foi utilizado o sistema de aquisição automática de dados implementado, o que permitiu a coleta de dados, em tempo real, de força de tração requerida pela barra de tração, torque requerido e rotação da tomada de potência (TDP), e velocidade de deslocamento da colhedora de feijão. Foram determinadas, também, a capacidade de processamento da máquina e as perdas ocorridas na área.

Um modelo de simulação foi desenvolvido a fim de analisar o comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão. O modelo de simulação foi desenvolvido, usando-se o programa ADAMS versão 10.0. Este modelo incluiu a

simulação do trator, interação entre solo e pneu, simulação do sistema de transmissão de potência e dos sistemas de trilha e limpeza da colhedora de feijão. Foram modelados o trator, composto por oito corpos rígidos, o banco, o operador, dividido em três partes, e a colhedora de feijão composta por quatro corpos rígidos.

A taxa de alimentação de feijão colhida pela colhedora foi calculada, em função do número de linhas enleiradas, distância entre as fileiras, velocidade longitudinal do sistema, produtividade do feijão e da relação, em massa, de palha e grão da cultura. O peso do produto no tanque graneleiro foi obtido, integrando-se a taxa de alimentação do produto à máquina, em função do tempo.

Finalmente, foram realizadas análises do comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão, sob três diferentes condições de simulação, com o objetivo de validar o modelo desenvolvido.

Por meio de análises e interpretações dos resultados obtidos, conclui-se que:

1. No trabalho realizado, implementou-se um sistema de aquisição automática de dados e desenvolveu-se o aplicativo AvaliaMA para avaliação de máquinas agrícolas buscando a coleta de dados de uma forma eficiente e eliminando os erros tradicionais gerados pela coleta de dados convencional, como anotações incorretas em planilhas e perda de dados.

2. Observou-se, durante ensaios, facilidade de operação do sistema, permitindo rapidez na operação de aquisição de dados, e a capacidade de combinar o sistema implementado para atender a demandas de diversas pesquisas, podendo ser utilizado em diferentes tipos de máquinas agrícolas.

3. Comparando-se os resultados obtidos com o uso do AvaliaMA com as técnicas tradicionais, obteve-se um R^2 superior a 0,98, em todos os testes realizados, e observou-se o maior erro relativo médio de 8,91%, para a determinação de velocidade de deslocamento.

4. Sugere-se a realização de ensaios do sistema de aquisição automática de dados e do aplicativo AvaliaMA, sob condições de campo, com maior carga horária e instalado em diferentes máquinas agrícolas.

5. O maior valor de torque requerido na TDP, observado durante os ensaios de campo para a rotação de 420 rpm na TDP, foi de 730,84 mN, resultando numa potência requerida na TDP de 26,79 kW, enquanto para a condição de 540 rpm foi de 907,21 mN, resultando numa potência requerida na TDP de 47,96 kW.

6. O conjunto apresentou, durante os ensaios de campo, capacidade de processamento de 3,06 t/h, para uma área com produtividade média de 2186,63 kg/ha. Os valores de perdas ocorridos nos sistemas da plataforma de recolhimento, trilha e separação, e limpeza encontrados foram 114,93, 72,11, e 9,11 kg/ha, respectivamente, totalizando cerca de 11,15 % de perdas.

7. Um modelo matemático para simular o comportamento dinâmico do trator foi desenvolvido e utilizado para simular seu raio de giro observando-se, na comparação dos valores simulados com os dados experimentais, um erro máximo de 1,82%.

8. Um modelo matemático para simular o comportamento dinâmico do conjunto trator-colhedora de feijão foi desenvolvido e utilizado, sob três diferentes condições. O modelo de simulação foi validado comparando-se os dados obtidos sob testes experimentais desenvolvidos em condições de campo com os valores obtidos na simulação.

9. Comparando-se os dados obtidos sob testes experimentais desenvolvidos em condições de campo com os valores obtidos na simulação, observou-se, na primeira condição simulada, em que a taxa de alimentação total simulada foi calculada, utilizando-se o número de linhas, a produtividade da área e características do trator, que o modelo simulou melhor a taxa de alimentação total e a potência requerida na TDP observando-se erro relativo médio de 13,61% e 25,99%, respectivamente.

10. Na segunda condição simulada, em que a taxa de alimentação total simulada foi considerada como sendo a estimada a partir de dados experimentais, o modelo simulou melhor a velocidade de deslocamento, a rotação da TDP e o torque requerido na TDP observando-se erro relativo médio de 16,91%, 5,76% e 28,88%, respectivamente.

11. Sugere-se, com base nos resultados encontrados, alterações e aprimoramento no modelo de simulação desenvolvido com o objetivo de se reduzir os erros observados.