

ANÁLISE MODAL DO SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO DE CAFÉ

Arturo MARTÍNEZ Rodríguez¹ E-mail: armaro6@yahoo.es, Daniel Marçal de QUEIROZ², Benjamin GASKIN Espinosa³ e Hugo MATSUO²

¹Centro de Mecanización Agropecuária, Universidad Agraria de La Habana, Cuba. ²Depto. Engenharia Agrícola, UFV, MG, Brasil. ; ³Facultad de Mecanización Agropecuaria, Universidad de Granma.Gr. Cuba.

Resumo:

A colheita de café com o auxílio de sistemas mecânicos tem sido impraticável para uma grande maioria de produtores de café no mundo. Isso se deve fundamentalmente ao fato de que no momento da colheita as plantas apresentam frutos em todos estádios de maturação e por não se ter equipamentos para a colheita seletiva dos frutos. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se realizar uma análise dos modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo visando a colheita seletiva. Foram utilizadas modernas ferramentas CAD-3D e o método de análise por elementos finitos. Determinou-se a frequência natural para o desprendimento de frutos verdes e maduros. Os resultados obtidos mostraram que o modo de vibração em contrafase apresenta grande potencial para a realização da colheita seletiva. Os valores de frequência calculados para esse modo são bem superiores ao empregados nas máquinas que fazem a colheita de café por vibração.

Palavras-chave: colheita de café, seletividade, vibrações, análise por elementos finitos, sistema fruto-pedúnculo.

MODAL ANALYSIS OF FRUIT-PEDICEL-PEDUNCLE SYSTEM OF COFFEE CHERRIES

Abstract:

Coffee harvesting with the aid of mechanical systems becomes impracticable for most of coffee producers in the world, basically due to the fact that fruits do not become ripe at same time. Until now, machines that guarantee a selective detachment of the cherries during harvest operation for small scale production are not available. In this study an analysis of vibration modes of different configurations of the fruit-pedicel-peduncle system of coffee, carried out with modern CAD-3D tools and methods of Finite Element Analysis, is presented. Starting from this analysis, the possibility of achieving the selective detachment of the fruits (removing of a high percentage of mature fruits and low percentage of immature ones) can be expected if the vibrating frequencies of the machines that use this work principle, are selected in the environment of a vibration mode "in contrafase" of the fruit-pedicel-peduncle system. The calculated values of frequencies corresponding to this mode were significantly higher to those traditionally used in machines that use vibration like work principle for fruit detachment.

Key words: coffee harvesting, selectivity, vibrations, finite element analysis, fruit-pedicel-peduncle system.

Introdução

O café é considerado um dos mais importantes produtos agrícolas no mercado internacional e muitos países estão envolvidos na sua produção, consumo e comercialização.

Dentro dos custos de produção de café, a mão-de-obra empregada na colheita representa 25 - 35% do total, e os custos do processo de colheita podem atingir até 70% do custo de produção total (Monroe e Wang, 1968). Uma das formas mais efetivas de redução dos custos de colheita é a partir do aumento da produtividade do trabalho do pessoal envolvido na colheita por meio do uso de sistemas mecanizados ou de dispositivos de auxiliem a colheita manual.

O café se caracteriza por ter no momento da colheita frutos com diferentes estádios de maturação. Isso confere um alto grau de dificuldade na mecanização da colheita quando se deseja realizar a mesma de forma seletiva buscando uma elevada percentagem de frutos maduros e uma baixa percentagem de frutos verdes na massa de produto colhido.

Segundo Varnam (1996), para se obter um produto final de ótima qualidade, o café deve ser colhido com os frutos estão no estádio de cereja. Os frutos verdes ou os excessivamente maduros são de processamento difícil, resultando em um produto final de baixa qualidade. Carvalho Junior et al. (2003) obtiveram resultados que sugerem que a operação de colheita pode favorecer a melhoria da qualidade desde que ela seja realizada no momento em que tenha uma melhor seletividade.

Em âmbito mundial, até o momento, não se pode desenvolver um sistema mecanizado de colheita de café que possibilite um desprendimento seletivo dos frutos, já que os sistemas disponíveis atualmente provocam uma colheita de um elevado percentual de frutos verdes, dificultando a obtenção de um produto final de qualidade.

Monroe e Wang (1968) efetuaram estudos experimentais utilizando diferentes tipos de máquina vibradoras e obtiveram um desprendimento de frutos verdes entre 15 e 40%. Os autores concluíram que até aquele momento, era inevitável o desprendimento de frutos imaturos, sendo necessário a realização de uma separação pós-colheita.

Shellenberger et al. (1969) desenvolveram e avaliaram diferentes tipos de mecanismos portáteis de vibração de baixo peso. Esses mecanismos eram mais adequados à colheita em regiões montanhosas. Os autores ratificaram a

difficuldade de se realizar uma completa seletividade durante o desprendimento dos frutos por vibração, por isso, desenvolveram protótipos de separadores para serem utilizados na etapa posterior a colheita.

Em Cuba, Martinez et al. (1989), em experimentos realizados com aplicação de Flordimex (base em etileno), os frutos maduraram uniformemente e a colheita mecânica por vibração em torno do primeiro modo de vibração (pendular) do sistema fruto-pedúnculo (16,67 Hz com amplitude de 20 mm) foi um êxito, conseguindo-se um desprendimento dos frutos maduros e verdoengo entre 93 e 96%, com um desprendimento de frutos verde máximo de 5,16%. Entretanto, a qualidade do produto foi inferior. A explicação encontrada é que os frutos maduraram externamente, mas os grãos permaneceram com sabor de fruto verde.

Souza et al. (2003), em condições do Estado de Minas Gerais, obtiveram com amplitudes de vibração de 22 e 33 mm e frequências de vibração entre 18 e 20 Hz maior eficiência de desprendimento dos frutos e menor tempo necessário para a derriça. Entretanto, não se obteve um desprendimento seletivo dos frutos.

Na década de 1970 e mais recentemente são apresentados numerosos trabalhos científicos relacionados com o emprego de produtos químicos (Browning et al. 1970; Clowes et al. 1977; Oyebade 1976; Opile et al. 1975, ICTI, 2002) ou de estresse hídrico (Gopal et al., 1973; Alvim, 1973) conduzidos com o objetivos de uniformizar a floração e a maturação do café.

Rodrigues et al. (2003) concluíram que com um a indução de um estresse hídrico, seja pela suspensão da irrigação, seja pela falta de chuvas, a floração dos cafeeiros ocorrem de forma uniforme ao longo dos ramos da planta sete dias depois de reiniciada a aplicação de água.

Alves (2003), submetendo as plantas de *coffea arábica* L., variedade Catucaí IAC 15 a um estímulo mecânico produzido pela ação do vento originado por um atomizador, obteve que apenas a aplicação de um estímulo no período da floração ou no período de pré-colheita, foi suficiente para antecipar e homogeneizar a maturação dos frutos. Resultado esse que favorece a aplicação da colheita mecanizada.

Em determinadas condições, como na área de Mareeba, Austrália, o clima seco e o manejo da irrigação prévia à floração possibilita o controle da floração em um alto grau, obtendo-se uma floração e maturação uniforme dos frutos. Isso torna mais viável a colheita mecanizada (Kuhn, 2004). Entretanto, tais condições climáticas, assim como a possibilidade de contar com sistemas de irrigação não são condições comuns a imensa maioria das zonas produtoras de café no mundo.

Essas tentativas de uniformizar a maturação constituem-se em notáveis avanços na direção de mecanizar a colheita de café com alto grau de seletividade. Entretanto, ainda hoje esses métodos são ainda inaplicáveis para a maioria dos produtores.

Mesmo com os avanços já alcançados no sentido de se melhorar a uniformidade de maturação, torna-se necessário continuar o aperfeiçoamento dos métodos e sistemas de colheita desenvolvidos, assim como estudar e ensaiar outros regimes de trabalho para se conseguir melhores resultados no sentido de diminuir o desprendimento de frutos verdes no produto colhido, aspecto esse que representa o principal obstáculo a ser vencido pelos pesquisadores na atualidade.

Os estudos teóricos desenvolvidos pelo Centro de Mecanização Agropecuária da Universidade Agrária de Havana com base em modelagem matemática do sistema fruto-pedúnculo do café (Martínez, et al., 1988; Ciro et al., 1998; Martínez, et al. 2004) indicam que é possível melhorar os índices de seletividade durante o desprendimento por vibração, quando se empregam regimes de vibração próximos a um modo de vibração em contrafase do sistema fruto-pedúnculo. Entretanto, nos trabalhos já realizados em todo o mundo só se tem experimentado regimes de vibração próximos ao primeiro modo de vibração (modo pendular) do sistema (Wang, 1965; Monroe e Wang, 1968; Martínez et al., 1989; Ariztizábal, et al., 1999; Souza et al. 2003). Também, tem sido realizados estudos das características da vibração do sistema fruto-pedúnculo do café empregando o método de elementos finitos (Yung e Ching, 1974), entretanto, tal estudo visou apenas a obtenção de frequências naturais para o primeiro modo de vibração.

O objetivo principal desse estudo foi analisar os modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo de café com a utilização de técnicas modernas de CAD e de análise por elementos finitos.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado por meio de um convênio entre o Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e o Centro de Mecanização Agropecuária da Universidade Agrária de Havana, Cuba.

A partir dos dados característicos das dimensões de frutos de *coffea arábica* variedade caturra (Gaskin et al. 2003) foram simuladas utilizando-se ferramentas CAD-3D diferentes formações do sistema fruto-pedúnculo do café, foram modelados conjuntos com 1, 2 e 3 frutos de café tanto maduros como verdes, com o pedicelo preso a um mesmo pedúnculo. Para as simulações utilizaram-se valores médios de comprimento e diâmetro dos frutos assim com os comprimentos e diâmetros dos pedúnculos e pedicelos.

Os modelos obtidos foram submetidos a uma análise modal até o 12º modo de vibração empregando-se um programa computacional de análise por elementos finitos. Para a definição da malha de elementos foram empregados elementos do tipo piramidal, resultado em um total de 7.746, 8.753 e 10.350 elementos para os conjuntos contendo 1, 2 e 3 frutos, respectivamente.

Como dados de entrada do programa computacional foram utilizados os módulos de elasticidade apresentados por Ching (1974) e o coeficiente de Poisson do pedúnculo e pedicelo e os valores de massa específica dos frutos obtidos por Gaskin (2003) para *coffea arábica* variedade caturra.

Resultados e Discussão

Na Tabela 1 são apresentados os valores de frequência correspondente aos modos de vibração de maior interesse do ponto de vista de desprendimento dos frutos. Pode-se verificar que no modo de vibração pendular as diferenças entre as frequências naturais para frutos maduros e frutos verdes são pequenas, entre 3 e 5 Hz, o que explica a dificuldade de se realizar a colheita seletiva com o uso desse modo de vibração. Para o modo de vibração em contrafase (Figura 1), essas diferenças oscilam entre 50 e 150 Hz, o que torna a seletividade muito mais favorável.

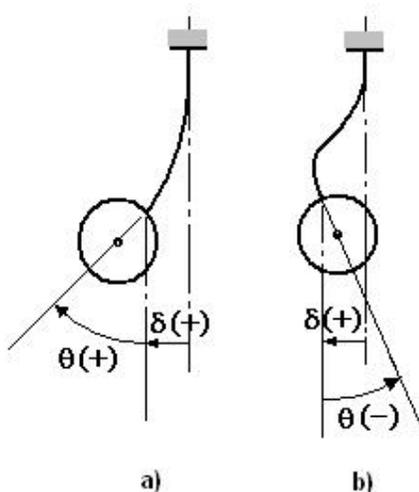


Figura 1 – Esquema mostrando os modos de vibração (a) pendular e (b) em contrafase.

Na Figura 2 são apresentadas as distribuições de deformação obtidas pelo método de elementos finitos para diferentes modos de vibração, em que as escalas de deformações aumenta do azul para o vermelho. É evidente que no caso da Figura 1.b, que se trata do caso do modo de vibração em contrafase, as deformações maiores ocorrem na zona da união entre o pedicelo e o pericarpo. Isso coincide com resultados obtidos por Tongumpai (1993) que verificou que frutos maduros se desprendem nessa união, enquanto que os frutos verdes se desprendem na união entre o pedicelo e o pedúnculo ou entre o pedúnculo e a união com o ramo de café.

Desses resultados pode-se concluir que um modo de vibração em contrafase, com frequência natural entre 160 e Hz seria favorável para obter melhores índices de seletividade durante a colheita de café por vibração. Isso se deve ao fato de que existe uma maior separação entre as frequências de ressonâncias correspondentes a este modo entre frutos verdes e maduros. Outra vantagem do uso desse modo de vibração é que se produz maiores deflexões na região de união entre o pedicelo e o pericarpo, favorecendo o desprendimento seletivo dos frutos maduros.

Tabela 1. Frequências de ressonância correspondentes aos modos de vibração de maior interesse para diferentes configurações do sistema fruto-pedicelo-pedúnculo.

Modo de Vibração	Frequência, Hz					
	Configurações do sistema fruto-pedúnculo com frutos maduros			Configurações do sistema fruto-pedúnculo com frutos verdes		
	1 Fruto	2 Frutos	3 Frutos	1 Fruto	2 Frutos	3 Frutos
Pendular 1	12,505	13,142	12,024	17,291	16,193	15,948
Pendular 2	13,089	14,154	12,495	18,634	17,825	16,750
Contrafase 1	178,51	170,52	158,48	237,99	207,09	207,67
Contrafase 2	185,53	201,09	163,65	269,5	251,76	216,75
Contrafase-Torcional	-	266,93	219,34	-	374,63	351,53

Conclusões

Utilizando o modelo matemático implementado desenvolvido com base na técnica de elementos finitos pode-se concluir que o modo de vibração tipo contrafase apresenta maior potencial para a colheita seletiva, pois a frequência natural de vibração desse modo para frutos verdes está na faixa de 207 a 237 Hz, enquanto que a frequência natural para frutos maduros está na faixa entre 158 e 179 Hz.

Referências bibliográficas

- Alves, J. D., et al. (2003). Estudo da Maturação do café por estímulo mecânico. Anais do III Simpósio de Pesquisa dos cafés do Brasil. Embrapa Café. Brasília, DF. p 68.
- Alvim, P. de T. (1973). Factors affecting flowering of coffee. J. Plantation Crop. 1:37-43
- Ariztizábal, T.; Oliveros T, C.E.; Álvarez, M. F.(1999). Cosecha Mecánica del Café mediante Vibraciones Multidireccionales. Cenicafe. Vol.50, No.3 Julho-Setembro.
- Browning, G.; M.G.R. Cannell.(1970). Use of (2-chloroethyl) phosphonic acid to promote the abscission and ripening of *Coffea arabica* L. Journal Hort. Sci. 45: 223-232.
- Carvalho Junior, C.de, et al. Influência de Sistemas de Colheita na Qualidade do Café Cereja/Verde, Bóia e Mistura. Anais do III Simpósio de Pesquisa dos cafés do Brasil. Embrapa Café. Brasília, DF. 2003. p 175.
- Ciro, H.J.; Oliveros T, C.E.; Alvarez M,A. (1998). Estudio Dinámico bajo Oscilación Forzada del Sistema Fruto-Pedúnculo del Café Variedad Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. Vol 51 No.1.
- Clowes, M.St.J. The effects of ethrel on ripening *Coffea arabica* L. fruits at different stages of maturity. Rhodesia J. Agr. Res. 75: 79-88. 1977.
- Souza, C.M. A., Daniel M. Queiroz, Francisco A.C. Pinto, Paulo R. Cecon. Análise de derriça de frutos do cafeeiro submetidos à vibração em laboratório. Anais do III Simpósio de Pesquisa dos cafés do Brasil. Embrapa Café. Brasília, DF. 2003. p 155-156
- Gaskin, E.,B; et al, (2004). Determinación de las características dimensionales de los árboles de *Coffea arabica* variedad Caturra y su distribución en el área experimental en condiciones de la provincia Granma. Proceedings de la I Conferencia de Ingeniería Agrícola de la Habana Agring'2004. ISBN 959-16-0266-6
- Gopal, N.H.: N. Vasudeva. (1973). Physiological studies on flowering in arabica coffee under South Indian conditions. Growth of flower buds and flowering. Turrialba. 23: 146-153.
- Kuhn, D. (2004). "Mareeba", the town with the world's most diverse collection of coffee harvesters. Tee & Coffee ASIA. www.teecoffeeasia.com.
- Martínez, A. et al. (1988). Reporte de Investigaciones sobre la Cosecha Mecanizada del Café (I Parte). Monografías de la DICT-ISCAH. No. 22. La Habana.
- Martínez, A. et.al. (1989). Determinación de los Parámetros de un Órgano de Trabajo para la Cosecha Mecanizada del Café por Vibración. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol.2 No.3.
- Martínez R., A; Gaskin E., B; Llanes G.,O. (2004). Pronóstico para la Cosecha Selectiva del Café por Vibración. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol. 13. No.2.
- Monroe,G.E. y J.K. Wang. (1968). Systems for Mechanically Harvesting Coffee. Transactions of the ASAE. Vol.11
- Opile, W.R.; G. Browning. (1975). Regulated ripening of *Coffea arabica* L. in Kenya: Studies on the use of 2-chloroethyl phosphonic acid. Acta Hort. 49: 125-137.
- Oyebade, T. (1976). Influence of pre-harvest sprays of ethrel on ripening and abscission of coffee berries. Turrialba. 26: 86-89..
- ICTI. Integrated Coffee Technologies Incorporated. (2002). No al Café Genéticamente Modificado. Radio Suiza Internacional. Temas de Suiza. Abril del.
- Rodrigues, G.C., et al. (2003). Efeito do Regime Hídrico na Floração de *Coffea arabica* L. CV Catuaí Rubi MG1192. Anais do III Simpósio de Pesquisa dos cafés do Brasil. Embrapa Café. Brasília, DF.. p 127-128.
- Shellenberger, F.A. et. al. (1969). Mechanical Grape Harvesting Equipment. Transactions of the ASAE. Vol. 12.
- Tongumpai, P. (1993). Strategies for Machine Harvesting of Mature Coffee (*Coffea arabica* L.) Fruits. PhD. Thesis. Oregon State University.
- Varnam, A y Jane P. Sutherland, (1996). Bebidas: Tecnología, Química y Microbiología. Zaragoza, Acribia. ICO International Coffee Organization.
- Wang, J.K. (1965). Mechanical Coffee Harvesting. Transactions of the ASAE. Vol.8 No. 3 .
- Yung, Ching.; R.B.Fridley. (1974). Computer Analysis of Fruit Detachment During Tree Shaking. Paper ASAE No.74-3009.

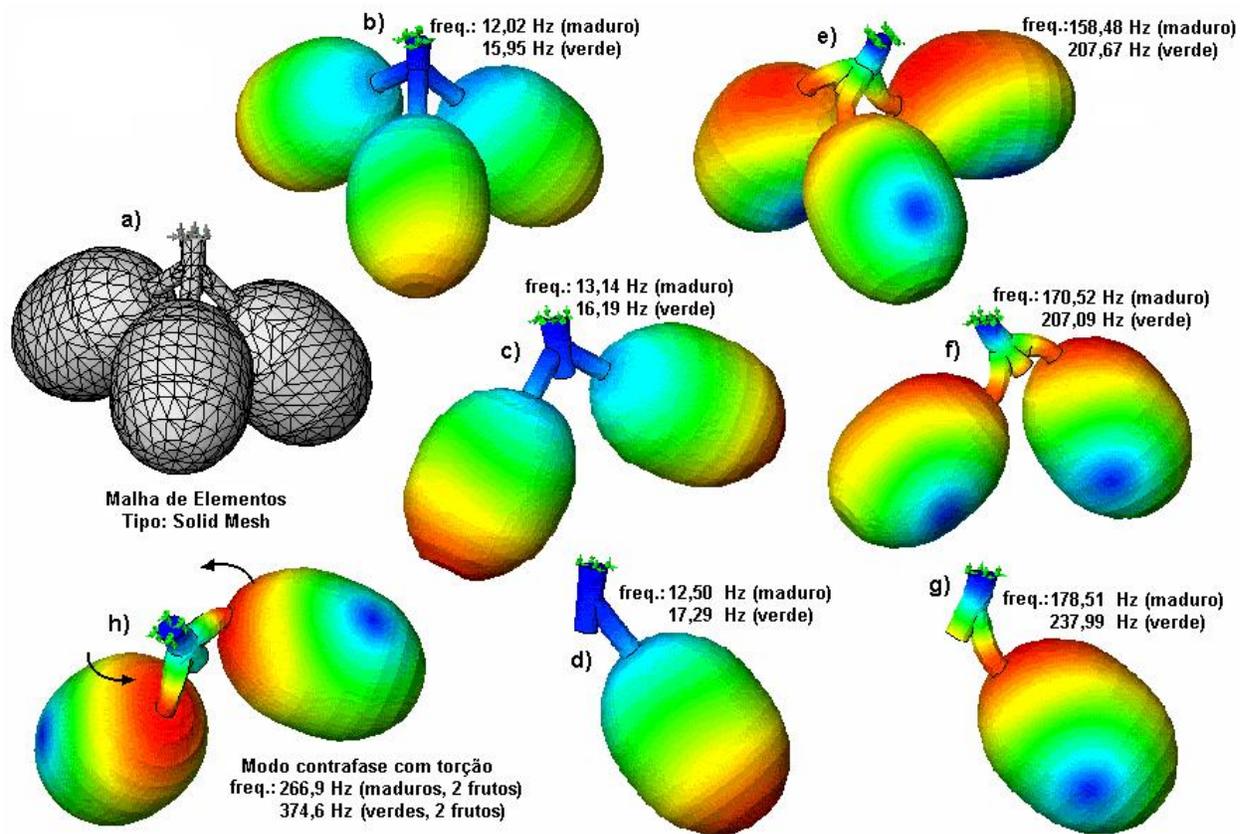


Figura 2 - Diferentes modos de vibração do sistema fruto-pedúnculo do café. (a) Malha de elementos para usada na análise modal por elementos finitos; (b), (c) e (d) Modo Pendular em configurações de 3, 2 e 1 fruto, respectivamente; (e), (f), (g) Modo em Contrafase em configurações de 3, 2 e 1 fruto, respectivamente; (h) Modo Contrafase com torção para uma configurações de 2 frutos.