

## **Modelación matemática del sistema fruto-pedicelo-pedúnculo del mango Manila\***

### **Mathematical modeling system of the fruit-pedicel-peduncle Manila mango**

**Pedro Ramón Mayans Céspedes<sup>1§</sup>, Gilberto de Jesús López Cansteñs<sup>1</sup>, Eugenio Romanchik Kriuchkova<sup>1</sup> y Luciano Pérez Sobrevilla<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola- Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Texcoco, México. C. P. 56230. Tel: 5959521680. (alelopez10@hotmail.com; eugenior@correo.chapingo.mx; sobrevill2002@hotmail.com). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: mayans@correo.chapingo.mx.

#### **Resumen**

El cultivo del mango en México representa una fuente importante de empleos, ingresos y generación de divisas, sólo en el año 2002 ingresó al país 134 millones de dólares al exportar 195 mil toneladas de mango. México aporta a las exportaciones mundiales el 30% del total de la producción, lo que lo sitúa como el mayor exportador del mundo; sin embargo, su cosecha se realiza de forma manual. El presente trabajo tiene como objetivo determinar los regímenes de vibración más apropiados para el desprendimiento selectivo de los frutos empleando un modelo de dos grados de libertad. Los datos de entrada para la evaluación de este modelo fueron las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-pedicelo-pedúnculo. Como resultado de la modelación se obtuvieron las respuestas de frecuencia para el desplazamiento lineal, ángulo de giro, momento flector y la fuerza traccional en los tres estadios de maduración, observándose separación entre las frecuencias de resonancia de los frutos verdes y maduros, lo que constituye una fortaleza para la cosecha selectiva de los frutos. También se obtuvieron las bandas de frecuencia en la que sólo se produce la caída de los frutos maduros para diferentes amplitudes. Para el primer modo de vibración es suficiente con una amplitud de excitación de 10 mm para desprender solamente los frutos maduros en una banda de

#### **Abstract**

The mango cultivation in Mexico represents an important source of jobs, income and foreign exchange, only in 2002 entered the country 134 million dollars to export 195 thousand tons of mango. Mexico contributes to world exports 30% of total production, which places it as the largest exporter in the world; however, the harvest is done manually. This study aims to determine the most appropriate vibration systems for selective detachment of the fruits using a model of two degrees of freedom. The input data for the evaluation of this model were the physical-mechanical fruit-pedicel-peduncle system properties. As a result of modeling the frequency responses for linear movement, rotation angle, bending moment and tensile strength in the three stages of maturation observed separation between the resonance frequencies of green and ripe fruits they were obtained, which is a fortress for the selective harvesting of fruits. The frequency bands in which only the fall of the ripe fruits for different amplitudes produced were also obtained. For the first mode of vibration it is sufficient with an amplitude of 10 mm excitation to release only the ripe fruit in a band of 14.3 Hz (27.5-41.8 Hz); green fruit would divest from a frequency of 56 Hz demonstrating the possibility of selective harvesting the fruits of the handle.

\* Recibido: marzo de 2016  
Aceptado: junio de 2016

14.3 Hz (27.5-41.8 Hz); los frutos verdes se desprenderían a partir de una frecuencia de 56 Hz lo que demuestra la posibilidad de la cosecha selectiva de los frutos del mango.

**Palabras clave:** frecuencia de resonancia, modelación, selectividad y amplitud de excitación.

## Introducción

La modelación del sistema fruto-pedúnculo ha sido una herramienta utilizada durante las investigaciones relacionadas con la cosecha mecanizada de frutas por vibración desde la década de los sesentas (Fridley y Adrián, 1960; Rumsey, 1967; Cooke and Rand, 1969; Varlamov, 1972; Bobeva, 1972). El análisis de la dinámica del sistema fruto-pedúnculo, dirigido a determinar la respuesta de frecuencias de dicho sistema cuando es sometido a una excitación armónica ha sido objeto de diferentes modelaciones.

Los modelos clásicos pueden dividirse en dos grandes grupos: Los que consideran como causa predominante en el desprendimiento de los frutos la acción de las fuerzas de inercia centrífugas (de tracción) en las posibles zonas de abscisión (unión del fruto- pedúnculo; unión pedúnculo-ramas u otras) y los que consideran como causa predominante en el desprendimiento de los frutos la acción de momento de fuerzas de inercia que provocan flexión en la zonas de abscisión.

El primer grupo se asocian en algunos de los modelos desarrollados en Europa y Estados Unidos (Adrián and Fridley, 1965; Varlamov, 1972; Bobeva, 1972), durante estudios en la cosecha por vibraciones de frutas como la manzana, ciruelas y otros, mientras el segundo grupo se asocian fundamentalmente los modelos surgidos durante estudios de la cosecha por vibración de cítricos en los Estados Unidos de América (Cooke and Rand, 1969); en Cuba (Martínez, 1977; Castillo, 1995) también fue aplicado este modelo en guayaba (Herrera, 1980) en café (Martínez, 1989).

En las investigaciones realizadas en la cosecha de café mediante vibraciones ha sido continuada por Gaskins (2006), basados en esos modelos matemáticos determinó los modos y regímenes de vibración con vistas a la cosecha selectiva de los frutos del café.

**Keywords:** modeling, resonance frequency, selectivity and excitation amplitude.

## Introduction

The modeling of the fruit-stem system has been a tool used during investigations related to mechanical harvesting of fruits by vibration from the decade of the sixties (Fridley and Adrian, 1960; Rumsey, 1967; Cooke and Rand, 1969; Varlamov, 1972; Bobeva, 1972). The analysis of the dynamics of the fruit-peduncle system designed to determine the frequency response of the system when subjected to harmonic excitation has been subject to different modeling.

Classic models can be divided into two groups: Those who considered the predominant cause detachment of the fruits the action of centrifugal forces of inertia (driven) in the possible areas of abscission (fruit-union peduncle; peduncle-union branches or other) and those who believe as the predominant cause detachment of the fruits of action when inertial forces that cause bending in the abscission zones.

The first group are associated in some of the models developed in Europe and the United States (Adrian and Fridley, 1965; Varlamov, 1972; Bobeva, 1972), during studies at harvest vibration of fruits such as apples, plums and others, while the second group are mainly associated models encountered during studies citrus harvest vibration in United States of America (Cooke and Rand, 1969); in Cuba (Martínez, 1977; Castillo, 1995) it was also applied this model in guava (Herrera, 1980) in coffee (Martínez, 1989).

In research conducted at the coffee harvest by vibrations it has been continued by Gaskins (2006), based on these mathematical models determined vibration modes and regimes overlooking the selective harvesting of coffee fruits.

Both the model Cooke and Rand and the Martínez and Castillo have two degrees of freedom and take into account rightly the appearance of deflections in areas abscission of the fruit, which had not been considered in previous models and describing more accurately the phenomenon of bond failure of the fruit by the stem during harvest vibration.

Tanto el modelo de Cooke and Rand así como el de Martínez y Castillo presentan dos grados de libertad y tienen en cuenta en forma acertada la aparición de deflexiones en las zonas de abscisión de los frutos, que no habían sido consideradas en modelos anteriores y que describen con mayor exactitud el fenómeno del fallo de la unión del fruto por el pedúnculo durante la cosecha por vibraciones.

Como ventaja para la aplicación del modelo de dos grados de libertad propuesto por Martínez se puede señalar que a diferencia del modelo de Cooke and Rand permite no sólo determinar las frecuencias de resonancia del sistema fruto-pedúnculo, si no también calcular los momentos flectores que surgen en la zona de abscisión, lo que permite determinar las amplitudes de la excitación que provocan el desprendimiento de los frutos. Adicionalmente este modelo ha sido validado durante estudios experimentales realizados durante la cosecha por vibración en naranja por Martínez (1982), en toronja por Llanes (2000) y en café por Gaskins (2006).

En cuanto al modelo de Castillo, aunque también posibilita el cálculo de los momentos flectores y amplitud de la excitación, es aplicable para el caso de vibraciones en el eje vertical, típico de vibradores de follaje que no constituyen objeto de esta investigación.

### Materiales y métodos

El la Figura 1 se muestra una representación de este modelo, en el cual a partir del planteamiento de las ecuaciones de la dinámica para el cuerpo libre del fruto, así como de las ecuaciones de la deformación del pedúnculo, considerado como una viga elástica, se obtienen las ecuaciones diferenciales del movimiento, de las cuales se deriva la respuesta de frecuencias del desplazamiento  $\delta(\omega)$  en m, ángulo de giro del fruto  $\theta(\omega)$  en rad, así como del momento flector  $M(\omega)$  en N m y la fuerza normal  $N(\omega)$  en N, en la zona de unión del fruto y el pedúnculo (zona de abscisión):

$$\delta(\omega) = \frac{\left\{ \left[ \frac{(\omega)^2}{A_j} \right] - \left[ (\omega)^4 \frac{(1 - BD)}{(AC)} \right] \right\}}{Z(\omega)} X \tag{1}$$

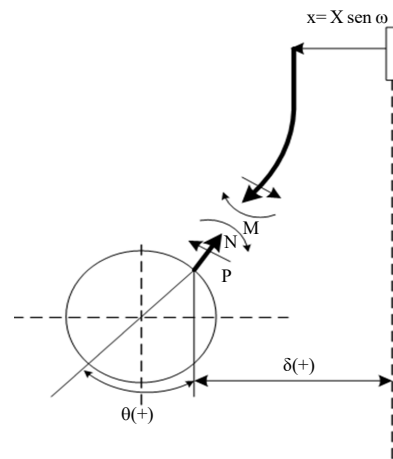
$$\theta(\omega) = \left[ \frac{\left[ \frac{D_j}{C_j} (\omega)^2 \right]}{Z(\omega)} \right]^2 X \tag{2}$$

An advantage to applying the model of two degrees of freedom proposed by Martínez may be noted that unlike the model Cooke and Rand can not only determine the resonance frequencies of the fruit-stalk system, but also calculate the bending moments arising in the abscission zone, which allows to determine the amplitudes of the excitation that cause detachment of the fruits. In addition, this model has been validated in experimental studies during harvest vibration in orange by Martínez (1982), in grapefruit by Llanes (2000) and coffee for Gaskins (2006).

As for the model Castillo, but also enables the calculation of the bending moments and amplitude of the excitation, is applicable to the case of vibrations in the vertical, typical foliage vibrators which are not under investigation axis.

### Materials and methods

The Figure 1 a representation of this model is shown, in which from the approach of the dynamics equations for the free body of the fruit, as well as the equations of deformation of peduncle, considered as an elastic beam, is obtain the differential equations of motion, of which the frequency response of displacement  $\delta(\omega)$  in m, angle of rotation of the fruit  $\theta(\omega)$  in rad, and the bending moment  $M(\omega)$  is derived in N m and the normal force  $N(\omega)$  in N, in the junction zone of the fruit and peduncle (abscission zone):



Donde: M= momento flector en la zona de unión del fruto y el pedúnculo; N= fuerza normal; P= fuerza cortante; x= excitación en la base del pedúnculo; X= amplitud de la excitación;  $\delta$ = desplazamiento del punto de unión del pedúnculo al fruto;  $\theta$ = ángulo de giro del fruto.

**Figura 1. Representación del modelo de dos grados de libertad propuesto por Martínez (1977).**  
**Figure 1. Representation model of two degrees of freedom proposed by Martínez (1977).**

$$M(\omega) = \frac{\left[ \frac{(ID - mr)}{C} (\omega)^4 \right] + [mr(\omega)^2]}{Z(\omega)} X \quad 3)$$

$$N(\omega) = mr \left[ \frac{\left[ \frac{D}{C} (\omega)^2 \right]}{Z(\omega)} \right]^2 (\omega)^2 X^2 + 9.8 m \quad 4)$$

$$Z(\omega) = (\omega)^4 \frac{(1 - BD)}{(AC)} - (\omega)^2 \frac{(A + C)}{(AC)} + 1 \quad 5)$$

Donde: A en s<sup>-2</sup>, B en m, C en s<sup>-2</sup>, D en m<sup>-1</sup> y se calculan como:

$$A = \frac{1}{(\alpha m + \beta mr)} \quad 6)$$

$$B = \frac{(\alpha mr + \beta I)}{(\alpha m + \beta mr)} \quad 7)$$

$$C = \frac{1}{(\beta mr + \gamma I)} \quad 8)$$

$$D = \frac{(\beta m + \gamma mr)}{(\beta mr + \gamma I)} \quad 9)$$

Donde:  $\alpha$  en m N<sup>-1</sup>,  $\beta$  en N<sup>-1</sup>,  $\gamma$  en N<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>, se calculan como:

$$\alpha = \frac{(lv)^3}{(3EI_2)} + \frac{[(lv_1)^2 lv]}{EI_1} + \frac{[lv_1(lv)^2]}{EI_1} + \frac{(lv_1)^3}{(3EI_1)} \quad 10)$$

$$\beta = \frac{(lv)^2}{(2EI_2)} + \frac{[lv_1 lv]}{EI_1} + \frac{(lv_1)^2}{(3EI_1)} \quad 11)$$

$$\gamma = \frac{lv}{EI_2} + \frac{lv_1}{EI_1} \quad 12)$$

Donde: m= masa del fruto, (kg); r= radio polar del fruto, (m); I= momento de inercia centroidal del fruto, (kg m<sup>2</sup>); lv<sub>1</sub>= longitud del pedicelo, (m); lv= longitud del pedúnculo, (m); EI<sub>1</sub>= rigidez del pedicelo, (N m<sup>2</sup>); EI<sub>2</sub>= rigidez del pedúnculo, (N m<sup>2</sup>); A, B, C, D,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ = parámetros que dependen de las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-pedicelo-pedúnculo.

En el modelo se consideran las propiedades elásticas del pedicelo y pedúnculo; los cuales son considerados cilíndricos y con la misma rigidez; la masa de los pedicelos se desprecia así como la masa y longitud de los pedúnculos. El sistema se considera lineal y sin amortiguamiento.

$$\delta(\omega) = \frac{\left\{ \left[ \frac{(\omega)^2}{A_j} \right] - \left[ (\omega)^4 \frac{(1 - BD)}{(AC)} \right] \right\}}{Z(\omega)} X \quad 1)$$

$$\theta(\omega) = \left[ \frac{\left[ \frac{D_j}{C_j} (\omega)^2 \right]}{Z(\omega)} \right]^2 X \quad 2)$$

$$M(\omega) = \frac{\left[ \frac{(ID - mr)}{C} (\omega)^4 \right] + [mr(\omega)^2]}{Z(\omega)} X \quad 3)$$

$$N(\omega) = mr \left[ \frac{\left[ \frac{D}{C} (\omega)^2 \right]}{Z(\omega)} \right]^2 (\omega)^2 X^2 + 9.8 m \quad 4)$$

$$Z(\omega) = (\omega)^4 \frac{(1 - BD)}{(AC)} - (\omega)^2 \frac{(A + C)}{(AC)} + 1 \quad 5)$$

Where: A in s<sup>-2</sup>, B in m, C in s<sup>-2</sup>, D in m<sup>-1</sup> and are calculated as:

$$A = \frac{1}{(\alpha m + \beta mr)} \quad 6)$$

$$B = \frac{(\alpha mr + \beta I)}{(\alpha m + \beta mr)} \quad 7)$$

$$C = \frac{1}{(\beta mr + \gamma I)} \quad 8)$$

$$D = \frac{(\beta m + \gamma mr)}{(\beta mr + \gamma I)} \quad 9)$$

Where:  $\alpha$  in m N<sup>-1</sup>,  $\beta$  in N<sup>-1</sup>,  $\gamma$  in N<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>, are calculated as:

$$\alpha = \frac{(lv)^3}{(3EI_2)} + \frac{[(lv_1)^2 lv]}{EI_1} + \frac{[lv_1(lv)^2]}{EI_1} + \frac{(lv_1)^3}{(3EI_1)} \quad 10)$$

$$\beta = \frac{(lv)^2}{(2EI_2)} + \frac{[lv_1 lv]}{EI_1} + \frac{(lv_1)^2}{(3EI_1)} \quad 11)$$

$$\gamma = \frac{lv}{EI_2} + \frac{lv_1}{EI_1} \quad 12)$$

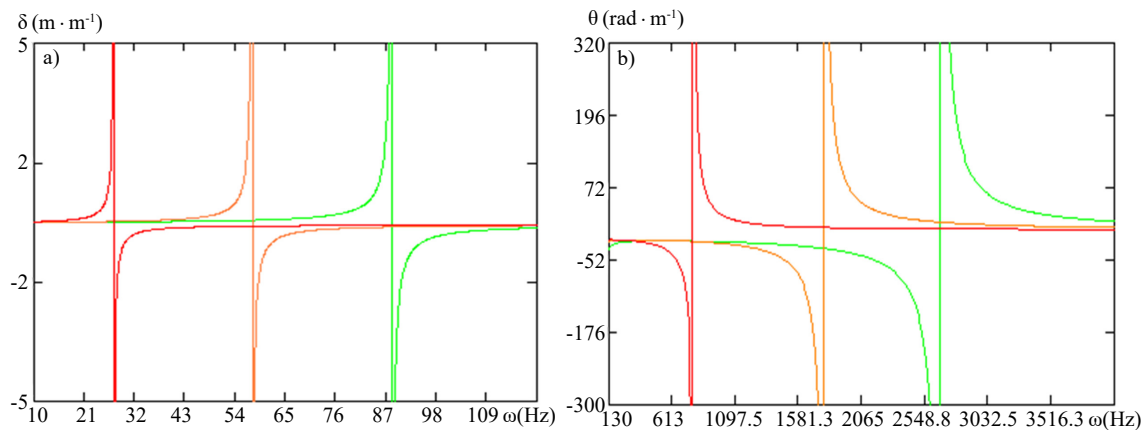
Where: m=mass of fruit (kg); r=polar radius of the fruit, (m); I= moment of inertia centroidal fruit (kg m<sup>2</sup>); pedicel L<sub>v1</sub>= length (m); lv = peduncle length (m); EI<sub>1</sub>= stiffness of the pedicel, (N m<sup>2</sup>); EI<sub>2</sub>=stiffness peduncle (N m<sup>2</sup>); A, B, C, D,  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$ = parameters depending on the physical-mechanical fruit-pedicel-peduncle system properties.

Para facilitar la evaluación del modelo, se empleó el programa de computación en lenguaje Mathcad utilizado en toronja por Llanes (2000) y en café por Gaskins (2006). Durante la evaluación de los modelos, se tuvo en cuenta la distribución estadística de las diferentes propiedades físico-mecánicas del objeto de estudio, dirigido a obtener las bandas de frecuencia de excitación requeridas para la cosecha selectiva del mango.

## Resultados y discusión

### Respuesta de frecuencia del desplazamiento y el ángulo de giro de los frutos

En la Figura 2a y 2b, se muestran los gráficos de respuesta de frecuencia, para una amplitud unitaria, del desplazamiento lineal ( $\delta$ ) (Figura 2a) y el angular ( $\theta$ ) (Figura 2b) de los frutos maduros (líneas rojas) y los frutos verdes (líneas verdes) correspondientes a la variedad de mango Manila. En los gráficos se aprecia la presencia de un primer modo de vibración cuyas frecuencias de resonancia se encuentran en un entorno de 26 a 81 Hz para el desplazamiento lineal, mientras que para el desplazamiento angular, la frecuencia de resonancia se encuentra en el intervalo 774.8 a 2621 Hz.



**Figura 2. Respuesta de frecuencia, a) desplazamiento lineal ( $\delta$ ) y b) ángulo de giro ( $\theta$ ) de los frutos.**

**Figure 2. Frequency response, a) linear displacement ( $\delta$ ) and b) turning angle ( $\theta$ ) of the fruit.**

Asimismo se aprecia que en el entorno de este modo, el desplazamiento de los frutos y su ángulo de giro presentan el mismo signo, lo cual es característico de un modo de vibración en fase o pendular. De la misma manera, se identifica en el entorno de frecuencias entre 1581.3 a 2548.8 Hz un segundo modo de vibración en el cual el desplazamiento de los frutos y su ángulo de giro presentan signos contrarios, lo cual es característico de un modo de vibración en contrafase.

The model considered the elastic properties of pedicel and peduncle; which they are considered cylindrical and with the same rigidity; the mass of the pedicels is neglected and the mass and length of the stems. The system is considered linear and undamped.

To facilitate the evaluation of the model, the computer program was used in Mathcad language used in grapefruit by Llanes (2000) and coffee Gaskins (2006). During the evaluation of the models took into account the statistical distribution of the different physical-mechanical object of study, aimed at obtaining the excitation frequency bands required for selective harvesting handle properties.

## Results and discussion

### Frequency response of the displacement and the rotation angle of the fruits

In Figure 2a and 2b, graphs of frequency response for a unit amplitude, linear displacement ( $\delta$ ) (Figure 2a) and the angle ( $\theta$ ) (Figure 2b) of ripe fruit (red lines) are shown and green fruits (green lines) corresponding to the Manila mango variety. In the graphs the presence of a first vibration mode whose

resonance frequencies are in an environment of 26-81 Hz for linear movement shown, while for the angular displacement, the resonant frequency is in the range 774.8 to 2621 Hz.

Also, it is seen that in the environment thus the displacement of the fruits and rotation angle have the same sign, which is characteristic of a vibration mode in phase or pendular. Similarly, it is identified in the neighborhood of frequencies

Es de destacar en este entorno de frecuencias, la separación apreciable entre las frecuencias de resonancia correspondientes a los frutos maduros y verdes, sin embargo tienen como inconveniente los altos valores de frecuencia para poder generarlo por medios mecánicos, por otro lado las curvas de respuesta de frecuencia de los frutos maduros y verdes en el entorno del primer modo de vibración (pendular) se encuentran con valores relativamente bajo, lo cual es posible lograrlo con medios mecánicos. Como se ha explicado, esta separación entre las frecuencias de resonancia de los sistemas para frutos maduros y verdes, constituye una fortaleza en relación con la posibilidad de la cosecha selectiva de los frutos.

### **Respuesta de frecuencia de las acciones interiores en la zona de abscisión**

En las Figuras 3 y 4, se muestra la comparación entre los efectos en el desprendimiento de los frutos de las acciones interiores en la zona de abscisión, ya sean los momentos flectores o las fuerzas traccionales; no obstante, en la práctica se ha demostrado que puede ocurrir la combinación de ambos efecto al momento de efectuarse el desprendimiento de los frutos. Las líneas horizontales representan el momento flector o la fuerza traccional (valores medios) requeridos respectivamente para el desprendimiento de los frutos maduros de la variedad de mango Manila.

De las figuras se aprecian que, tanto en el caso del momento flector (Figura 3a) como en el caso de la fuerza traccional (Figura 4a), para una amplitud de la excitación de 20 mm, bajo un modo de vibración pendular el entorno de frecuencias donde se superan los valores de las acciones interiores requeridos para lograr el desprendimiento de los frutos, es estrecho y cercano a la resonancia, mientras que bajo un modo de vibración en contrafase (Figura 3b y 4b) se superan ampliamente dichos valores, sobre todo en el caso del momento flector, lo que unido a las deflexiones que asume el sistema fruto-pedículo-pedúnculo en la zona de abscisión bajo este modo, reafirma la hipótesis de Martínez (1977) que el momento flector que se produce en la zona de abscisión durante el movimiento vibratorio del sistema fruto-pedúnculo, es el protagonista fundamental del desprendimiento de los frutos.

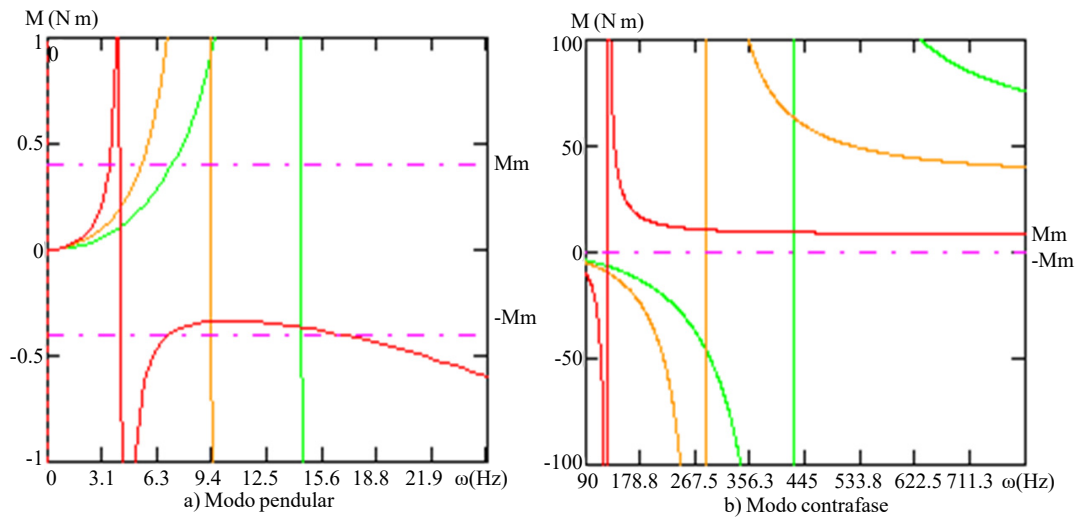
between 1581.3 to 2548.8 Hz a second mode of vibration in which the displacement of the fruits and rotation angle have opposite signs, which is characteristic of a vibration mode in antiphase.

It is noteworthy in this environment of frequencies, the appreciable gap between the resonance frequencies corresponding to ripe and unripe fruits; however, have the disadvantage of the high frequency values to generate by mechanical means, on the other hand curves frequency response of ripe and unripe fruit in the environment of the first vibration mode (pendular) are values relatively low which it is possible to achieve by mechanical means. As explained, this separation between the resonance frequencies of the systems and mature green fruit, is a strength in relation to the possibility of selective harvesting of fruits.

### **Frequency response of internal actions in the abscission zone**

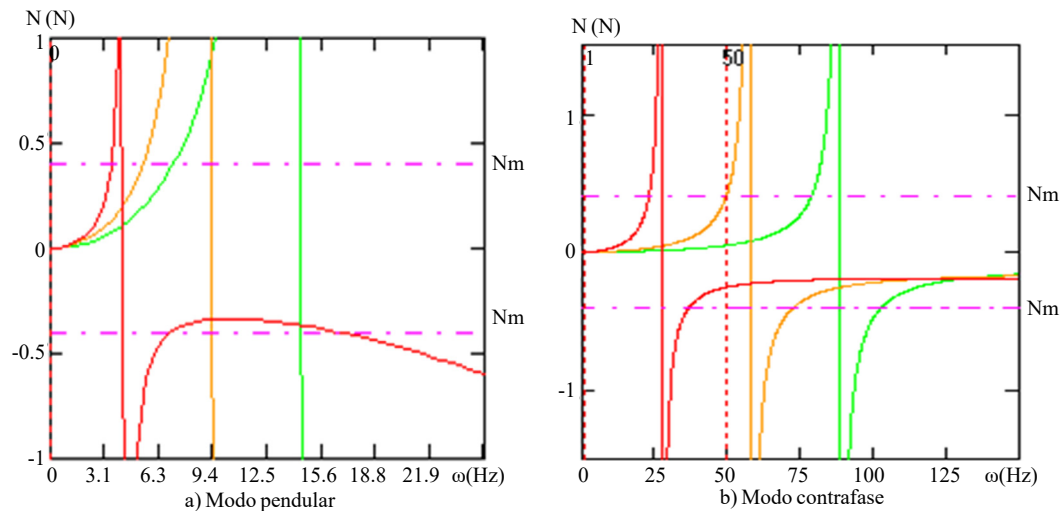
In Figures 3 and 4, comparing the effects shown in the detachment of the fruits of internal actions in the abscission zone, whether the bending moments or forces tractional; however, in practice it has been shown that the combination of both effects may occur when made detachment of the fruits. The horizontal lines represent the bending moment or tensile strength (mean values) respectively required for the release of the ripe fruits of the variety of mango Manila.

Of Figures appreciate that, in the case of bending moment (Figure 3a) as in the case of the tensile strength (Figure 4a), to an amplitude of the excitation of 20 mm, under a mode pendular vibration environment frequencies where the values of internal actions required are overcome to achieve the detachment of the fruits, is narrow and close to the resonance, while under a vibration mode in antiphase (3b and 4b) widely these values are exceeded, especially in the case of bending moment, which together with the deflections which assumes the fruit-pedicle-peduncle system in the abscission zone under this mode, reaffirms the hypothesis Martínez (1977) that the bending moment that occurs in the area abscission during the vibratory movement of the fruit-stem system is the key player in the evolution of the fruit.



**Figura 3. Respuesta de frecuencia del momento flector en la zona de abscisión y fuerza traccional para una amplitud de la excitación de 20 mm.**

**Figure 3. Frequency response bending moment in the abscission zone and tensile strength to an amplitude of the excitation of 20 mm.**



**Figura 4. Respuesta de frecuencia de la fuerza traccional en la zona de abscisión para una amplitud de la excitación de 20 mm.**

**Figure 4. Frequency response of tensile strength in the abscission zone for an amplitude of the excitation of 20 mm.**

En la Figura 5 se muestra la respuesta de frecuencia del módulo de la amplitud del momento flector (M) en la zona de abscisión para 10 mm de la amplitud (X) de excitación, para la variedad de mango Manila. Puede apreciarse que en el caso de un modo de vibración pendular, es suficiente una amplitud de la excitación de 10 mm para lograr el desprendimiento de los frutos maduros en una banda de frecuencias relativamente amplia de 14.3 Hz alrededor de la frecuencia de resonancia de los frutos maduros con propiedades físico-mecánicas medias, esto sin desprender frutos verdes, los cuales se desprenderían a partir de una frecuencia de 56 Hz.

In Figure 5 the frequency response amplitude module bending moment (M) in the abscission zone 10 mm amplitude (X) excitation to handle the variety of Manila shown. It can be seen that in the case of a mode pendular vibration is sufficient amplitude of the excitation of 10 mm to achieve the release of the ripe fruit in a relatively wide frequency band 14.3 Hz around the resonance frequency of the fruits mature with physical and mechanical properties mean this without removing unripe fruits, which would divest from a frequency of 56 Hz.

Esto se debe que en esa banda el momento flector producido por la excitación en la unión fruto-pedicelo, en el caso de los frutos maduros supera el valor del momento flector necesario para el desprendimiento de los frutos, representado en la figura por una línea horizontal discontinua de color roja para los maduros (Mm) y verde para los frutos verdes (Mv).

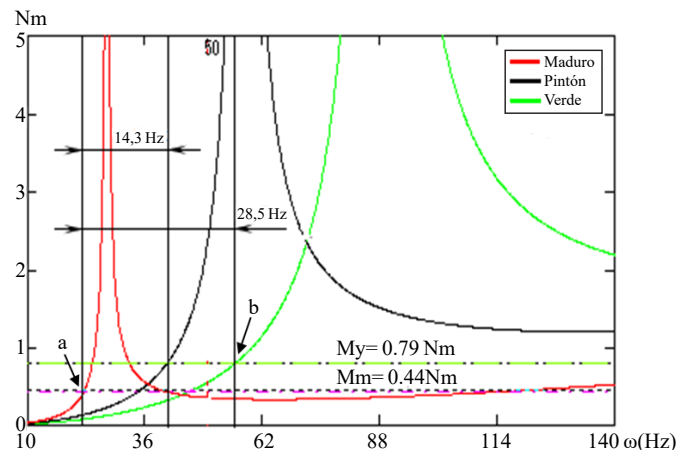
### Determinación de regímenes racionales de vibración

Hasta ahora, tanto los modos de vibración de las diferentes configuraciones de frutos, como la respuesta de frecuencias determinada sobre la base del modelo de dos grados de libertad del sistema fruto-pedicelo-pedúnculo, han sido obtenidos sobre la base de los valores medios de las características dimensionales y propiedades físico-mecánicas de los frutos, pedicelos y pedúnculos.

Sin embargo, cada una de estas propiedades presenta una distribución estadística, debido a lo cual, para cada uno de los estadios de maduración de los frutos y para cada uno de los modos de vibración, existirá una gama de frecuencias propias, alrededor de la frecuencia natural "media" que fue determinada sobre la base de los valores medios de las diferentes características dimensionales y propiedades físico-mecánicas que intervienen en los cálculos. Esta variabilidad estadística del sistema objeto de estudio es necesario considerarla a la hora de proponer un régimen de vibraciones racional para el desprendimiento selectivo de los frutos.

El análisis se efectuó tomando como base un modo de vibración en pendular. En la Figura 6 se muestra la respuesta de frecuencias del módulo del momento flector en la zona de abscisión del sistema fruto-pedicelo-pedúnculo en el entorno de un modo de vibración pendular, obtenido como resultado de la evaluación del modelo de dos grados de libertad con los valores medios de las propiedades físico-mecánicas de los componentes del sistema en diferentes estadios de maduración (maduros, pintones y verdes).

De la Figura 6 se observa una diferencia apreciable entre las frecuencias de resonancia "media" de los frutos maduros y de los verdes, encontrándose la frecuencia propias "media" de los frutos pintones (maduración fisiológica) entre ambas, aunque más cercana a la de los frutos maduros. Esta característica es favorable a la cosecha selectiva, ya que las normas de calidad permiten la cosecha de los frutos pintones.



**Figura 5. Módulo del momento flector para una amplitud de 10 mm (modo pendular).**

**Figure 5. Module bending moment for an amplitude of 10 mm (pendulum mode).**

This is because in that band bending moment produced by the excitement in the fruit-pedicel union, in the case of ripe fruits exceeds the value of the bending moment necessary for the release of the fruits, represented in the figure by a horizontal line discontinuous red color for mature (Mm) and green for green fruits (Mv).

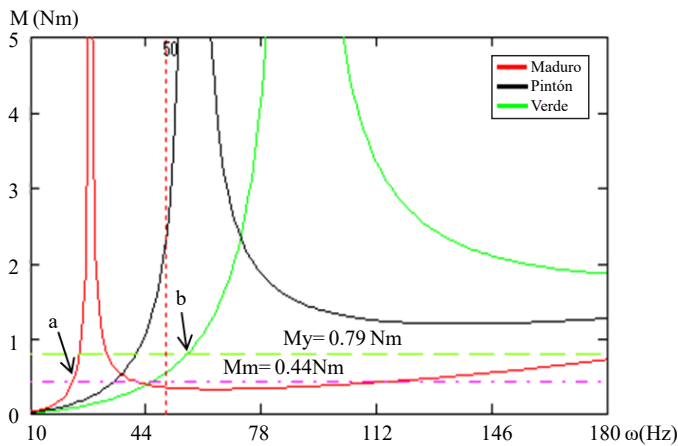
### Determination of rational schemes vibration

So far, both the vibration modes of the different configurations of fruits, as the response given frequency based on the model of two degrees of freedom of the fruit-pedicel-peduncle system have been obtained on the basis of average values the dimensional characteristics and physical-mechanical properties of fruits, pedicels and peduncles.

However, each of these properties has a statistical distribution, due to which, for each of the stages of fruit ripening and for each of the vibration modes, there will be a range of natural frequencies, around the frequency natural "average" which was determined based on the average values of different dimensional characteristics and physical-mechanical properties involved in the calculations. This statistical variability of the system under study is necessary to consider proposing a system of rational vibrations for selective detachment of the fruits.

The analysis was performed based on a pendulum vibration mode. In Figure 6 the frequency response module bending moment in the abscission zone of the fruit-pedicel-peduncle





**Figura 6. Módulo de respuesta de frecuencias en el entorno de un modo de vibración pendular del momento flector en la zona de abscisión del sistema fruto-pedicelo-pedúnculo en tres estadios de maduración del mango Manila.** Valores medios de las propiedades físico-mecánicas.

**Figure 6. Module frequency response in the environment of a pendulum vibration mode bending moment in the abscission zone-fruit-pedicle peduncle system in three stages of ripening mango Manila.** Mean values of the physico-mechanical properties.

Ahora bien, con anterioridad se ha explicado que sobre la base solamente de las frecuencias de resonancia “medias” no es posible establecer una estrategia para los regímenes de las vibraciones a aplicar. En la Figura 7, se observa que el límite izquierdo o de inferior frecuencia de resonancia, ha sido determinado sustrayendo o aumentando en  $\sigma$  (desviación media cuadrática) a los valores medios de las propiedades físico-mecánicas de los frutos maduros, en función de si influyen en el aumento o disminución de la frecuencia propia respectivamente.

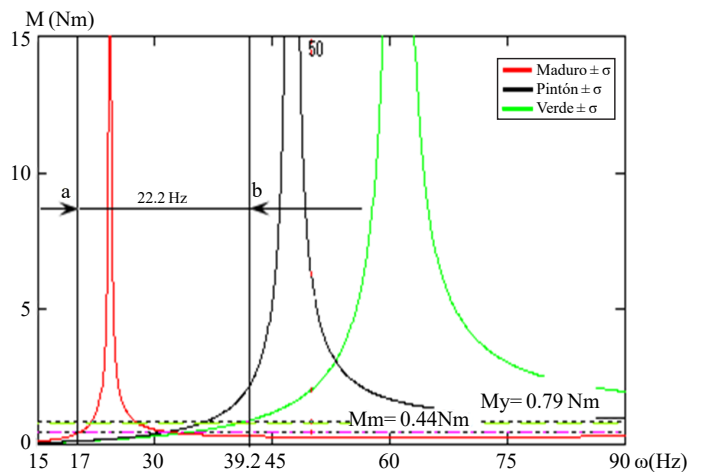
En la Figura 7 se muestran además, las líneas horizontales que representan los momentos flectores requeridos para el desprendimiento de los frutos, tanto maduros ( $M_m$ ), como verdes ( $M_v$ ), de manera que cuando las curvas de respuesta de frecuencia del momento flector de cada estadio de maduración, se encuentren por encima de las rectas  $M_m$  o  $M_v$  respectivamente, entonces se habrá superado el momento flector requerido para el desprendimiento de los frutos de dicho estadio de maduración y por tanto, serán desprendidos.

De aquí puede razonarse que la intersección de la curva de respuesta de frecuencias del momento flector en los frutos maduros de más baja frecuencia de resonancia, con

system in the environment of a mode pendular vibration is shown, obtained as a result of the evaluation model of two degrees of freedom with the average values of physical-mechanical system components at different stages of maturation (mature, pintones and green) properties.

Figure 6 is a noticeable difference between the frequencies of "average" resonance of ripe fruits and greens is observed, being the "average" own frequency of the fruits pintones (physiological maturity) between the two, but closer to that of ripe fruits. This feature is in favor of selective harvesting, because quality standards allow harvesting the fruits pintones.

However, previously it explained that on the basis only of the frequencies of "average" resonance is not possible to establish a strategy for vibration regimes applied. In the Figure 7 shows that left the limit or lower resonance frequency has been determined by subtracting or increasing in  $\sigma$  (mean square deviation) to the mean values of the physical-mechanical ripe fruits, properties depending on whether influence the increase or decrease respectively the own frequency.



**Figura 7. Módulo de las respuestas de frecuencias “límites” del momento flector en la zona de abscisión para una amplitud de la excitación de 10 mm.** Modo de vibración pendular del mango Manila.

**Figure 7. Module frequency responses “limits” of the bending moment in the abscission zone for an excitation amplitude of 10 mm.** Oscillation mode vibration Manila handle.

In Figure 7 further show, the horizontal lines representing the required for detachment of the fruits, both mature ( $M_m$ ) and green ( $M_v$ ) bending moments, so that when curves frequency response bending moment each stage of maturation, are

la recta Mm (punto a), define un valor de la frecuencia (17 Hz) a partir de la cual se desprenden los frutos maduros de esta variedad bajo amplitudes de la excitación de 10 mm. Si partiendo de este valor, se continúa incrementando la frecuencia de las vibraciones en forma de barrido hasta la frecuencia delimitada por el punto b (39.2 Hz), entonces se desprenderán los frutos maduros con características comprendidas en esta banda y al mismo tiempo se evitará el desprendimiento de frutos verdes.

La amplitud de la excitación presenta una marcada influencia en la selección de la banda de frecuencias a aplicar durante la cosecha selectiva. Un incremento de la amplitud de la excitación da como resultado un corrimiento de las bandas de frecuencias. En la Figura 8, puede apreciarse que, para una amplitud de la excitación de 10 mm, el barrido de frecuencias (definido por los puntos a y b) será entre 27.48 a 83.46 Hz para un rango de frecuencia de 55.98 Hz. Asimismo se aprecia que un excesivo valor de la amplitud de la excitación mayor de 20 mm, puede dar al traste con la posibilidad de obtener selectividad en la cosecha ya que la banda de frecuencia se estrecha a 51 Hz.

## Conclusiones

El momento flector para una amplitud de excitación de 20 mm y bajo un modo de vibración pendular, el entorno de frecuencia (3.74 Hz) donde se superan las acciones interiores para lograr el desprendimiento de los frutos maduros es estrecho y cercano a la frecuencia de resonancia, reafirmando la hipótesis de que el momento flector es el protagonista fundamental del desprendimiento de los frutos.

Para un modo de vibración pendular es suficiente una amplitud de excitación de 10 mm para lograr el desprendimiento de los frutos maduros en una banda de frecuencia de 14.3 Hz para las propiedades físico-mecánicas medias; los frutos verdes se desprenderían a partir de una frecuencia de 56 Hz.

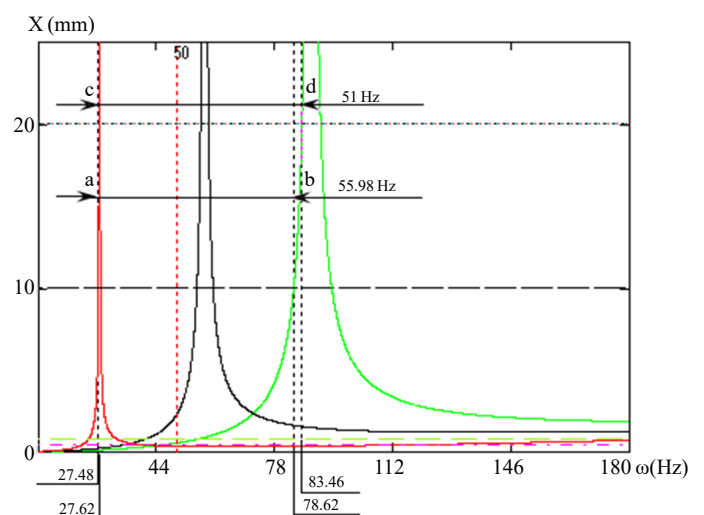
Cuando se adiciona o sustrae la desviación estándar a los valores medios de las propiedades físico-mecánicas de los frutos, esto influye en el aumento o disminución de la frecuencia de vibración.

El incremento de la amplitud de excitación produce un corrimiento en las bandas de frecuencia; un incremento excesivo de la amplitud afecta la selectividad porque se estrecha la banda de frecuencia.

above Mm or Mv respectively straight, then have exceeded the bending moment required for the release of the fruits of that stage of maturation and therefore will be detached.

From this it can be reasoned that the intersection of the curve of frequency response bending moment in mature fruits lower resonance frequency, with the straight Mm (point a), defines a value of the frequency (17 Hz) from which ripe fruits of this variety under the excitation amplitudes of 10 mm emerge. If, starting from this value, it continues to increase the frequency of the vibrations as sweep to the frequency defined by the point b (39.2 Hz), then the ripe fruits with characteristics ranging will be understood in this band and at the same time avoid the detachment of green fruits.

The amplitude of the excitation has a marked influence on the selection of the frequency band to be applied during the selective harvesting. An increase in amplitude of the excitation results in a shift of the frequency bands. In Figure 8, it can be seen that for an amplitude of the excitation of 10 mm, the frequency sweep (defined by points a) and b) is between 27.48 to 83.46 Hz for a frequency range of 55.98 Hz. Furthermore it is seen that excessive value of the amplitude of the greatest excitement of 20 mm, can ruin the possibility of selectivity in the harvest because the frequency band is close to 51 Hz.



**Figura 8. Módulo de las respuestas de frecuencias del momento flector en la zona de abscisión para una amplitud de excitación de 10 y 20 mm. Modo de vibración pendular para el mango Manila.**

**Figure 8. Module frequency responses bending moment in the abscission zone for excitation amplitude of 10 and 20 mm. Pendular vibration mode for Manila handle.**

## Literatura citada

- Adrian, P. A and Fridley, R. B. 1965. Dynamics and design criteria of inertia type tree shakers. Transactions of the ASAE, 8(4):12-14.
- Bobeva, M. 1972. Isledovanie otiskivaneto na malinovite plodove pri vibrirane. Sielskoskostonpanstva Tejnika, I, Sofia. 275 p.
- Castillo, M. A. 1995. Investigación del régimen óptimo de trabajo de los vibradores de follaje de acción vertical para el desprendimiento de naranja de Valencia en Cuba. Tesis de doctorado en Ciencia Técnicas, Universidad Agraria de la Habana, Cuba. 112 p.
- Cooke, J. R. and Rand, R. H. 1969. Vibratory fruit harvesting: a linear theory of fruit-stem dynamic. J. Agric. Eng. 14(3):195-200.
- Fridley, R. B. and Adrian, P. A. 1960. Some aspects of vibratory fruit harvesting. J. Agric. Eng. 41:28-31.
- Gaskins, E. B. G. 2006. Fundamentación de los modos y los regímenes de vibración del sistema fruto-pedicelo-pedúnculo del café para la cosecha selectiva de los frutos. Tesis doctoral en Ciencia Técnicas. Universidad Agraria de la Habana, Cuba. 109 p.
- Herrera, M. 1980. Estudio teórico de los regímenes de trabajo para el desprendimiento de guayaba por vibración. Tesis Profesional. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Habana, Cuba. 70 p.
- Llanes, O. 2000. Determinación de los parámetros de diseño de vibradores inerciales de ramas para la cosecha mecanizada de cítricos. Tesis doctoral en Ciencia Técnicas. Universidad Agraria de la Habana, Cuba. 101 pp.
- Martínez, R. A. 1977. Estudio teórico de la dinámica del sistema fruto pedúnculo. Revista Ciencias Técnicas. Serie construcción de maquinaria. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Habana, Cuba. Octubre. 14-16 pp.
- Martínez, R. A. 1982. Determinación de los parámetros de los órganos de trabajo para la cosecha mecanizada de naranjas por vibración. *In: Proceedings of the V International Citrus Congress.* Japón. 30 p.
- Martínez, R. A.; Morales, F. J. Gómez, A. D. y Aloysius, H. N. 1989. Determinación de parámetros de un órgano de trabajo para cosecha mecanizada de café por vibración. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 2(3):27-49.
- Rumsey, J. W. 1967. Response of citrus-stem system to fruit removing actions. MSc Tesis. University Arizona. Tucson. E. U. 85 p.

## Conclusions

The bending for excitation amplitude of 20 mm and under a mode pendular vibration, the setting frequency (3.74 Hz) where internal actions are exceeded to achieve the release of the mature fruits is narrow and close to the resonance frequency time, confirming the hypothesis that the bending moment is the key player in the evolution of the fruit.

For a pendular mode vibration amplitude is sufficient excitation of 10 mm to achieve the release of the mature fruits in a frequency band of 14.3 Hz for the average properties physicommechanical; green fruit would divest from a frequency of 56 Hz.

When it adds or subtracts the standard deviation to the mean values of the physical-mechanical fruit, properties this influences the increase or decrease in the frequency of vibration.

The increased amplitude excitation produces a shift in the frequency bands; an excessive increase of the amplitude affects the selectivity because the frequency band narrows.

*End of the English version*



- Varlamov, G. P. 1972. Determinación de los regímenes de trabajo de una máquina vibradora para la recogida de frutos. Trabajos del VISJOM. Moscú. 71:12-14.
- Yung, C. and Fridley R. B. 1975. Simulation of vibration of whole tree system using finite elements. Transaction of the ASABE. 18(3):475-481.