UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE INGENIERIA EN ALIMENTOS

Factibilidad de Desarrollo de un Método no Destructivo para Detectar Madurez en el Fruto Palta (*Persea americana mill*)

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al grado de Licenciado en Ingeniería en Alimentos

Cristián Adolfo León Vidal

VALDIVIA-CHILE

2001

INDICE DE MATERIA

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Principios físicos y fundamentos de acústica	3
2.1.1	Ondas mecánicas	3
2.1.2	Elementos que caracterizan una onda	3
2.1.3	Ondas ultrasónicas	4
2.2	Ondas planas en un fluido	5
2.2.1	Principio de ondas planas en un fluido	5
2.2.2	Solución armónica de la ecuación de onda plana	12
2.3	Impedancia acústica específica	13
2.4	Fenómeno de transmisión	14
2.4.1	Cambios en el medio	14
2.4.2	Transición de un medio fluido a otro; incidencia normal	15
2.5	Ondas estacionarias en un tubo	19
2.6	Atenuación de las ondas ultrasónicas en los sólidos	20
2.7	Fundamentos de la determinación del coeficiente de absorción acústica	21
2.8	La palta (*Persea americana mill.*)	30
2.8.1	Caracterización general fruto palta	30
2.8.2	Aspectos económicos del fruto	30
2.8.3	Crecimiento y desarrollo del fruto	31

2.8.4	Composición del fruto	31
2.8.5	Valor nutritivo del fruto	33
2.8.6	Maduración y cosecha	33
2.8.7	Indices de madurez	34
2.8.8	Características generales de la palta variedad fuerte	37
2.9	Otros antecedentes relevantes	38
3	MATERIAL Y METODO	39
3.1	Ubicación de los ensayos	39
3.2	Materia prima	39
3.2.1	Características del fruto utilizado	40
3.2.2	Materiales usados en el primer y segundo diseño	40
3.2.3	Materiales usados en el cuarto , quinto y sexto diseño	40
3.3	Equipos utilizados	41
3.3.1	Equipos utilizados en el primer y segundo diseño	41
3.3.2	Equipos utilizados en el cuarto , quinto y sexto diseño; y en la validación final	41
3.3.3	Instrumento utilizado para realizar el test de firmeza de la palta	41
3.4	Desarrollo de los diseños	42
3.4.1	Desarrollo del primer diseño	42
3.4.2	Desarrollo experimental del segundo y tercer diseño	43
3.4.3	Desarrollo experimental del cuarto diseño	45
3.4.4	Desarrollo experimental del quinto diseño	46
3.4.5	Desarrollo experimental del sexto diseño	47
3.4.6	Validación experimental del método del coeficiente absorción acústica en palta	48
3.4.6.1	Diseño experimental para la validación final	48
3.4.6.2	Análisis estadístico	49

4	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	51
4.1	Primer diseño	51
4.2	Segundo y tercer diseño	53
4.3	Cuarto diseño	54
4.4	Quinto diseño	56
4.5	Sexto diseño	58
4.6	Experiencia final	59
5	CONCLUSIONES	64
6	RESUMEN - SUMMARY	65
7	BIBLIOGRAFIA	67
	ANEXOS	72

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Composición química de la palta	32
2	Contenidos en aceites en diversos cultivares y países	35
3	Promedio y desviación estándar de firmeza de paltas almacenadas en un período de 11 días, a una temperatura 5°C.	36
4	Valores de coeficientes de absorción acústica para dos diferentes materiales	52
5	Absorción acústica de diferentes materiales a 2,5 W de potencia y 21500 Hz de frecuencia, para el cuarto diseño	55
6	Absorción acústica de diferentes materiales a 2,5 W de potencia y 21500 Hz de frecuencia , para el quinto diseño	56
7	Absorción acústica de diferentes materiales a 2,5 W de potencia y 21500 Hz de frecuencia , para el sexto diseño	58
8	Valores promedio de los diferentes parámetros de los frutos	60

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Modelo mecánico	4
2	Impulso de compresión en un fluido encerrado en un tubo	5
3	Reflexión y transmisión de ondas acústicas planas de un medio a otro	15
4	Representación de ondas estacionarias longitudinales	20
5	Esquema del sistema para medir el coeficiente de absorción acústica de materiales	27
6	Palta variedad fuerte	37
7	Diferentes materiales	40
8	Penetrómetro modelo FT327 (3-27 Lbs.)	42
9	Diagrama de bloques del primer sistema	43
10	Esquema de diseño de equipo línea de transmisión acústica	44
11	Diagrama de bloques del cuarto diseño	46
12	Diagrama de instrumento para la medición de absorción acústica superficial con sonda aislada	47
13	Diagrama de instrumento para la medición de absorción acústica superficial con sonda aislada al borde de la muestra	48
14	Lote de paltas de variedad fuerte	50
15	Coeficiente de absorción acústica de dos materiales en función de distintas frecuencias	53

16	Coeficiente de absorción superficial para diferentes materiales, para el cuarto diseño	55
17	Coeficiente de absorción superficial para diferentes materiales, para el quinto diseño	57
18	Coeficiente de absorción superficial para diferentes materiales, para el sexto diseño	59
19	Coeficiente de absorción acústica y firmeza del fruto palta variedad fuerte en función del tiempo de almacenamiento a 20°C	60
20	Estimación lineal para firmeza del fruto en función de su coeficiente de absorción para 144 horas de almacenamiento a 20°C	61
21	Medición de la absorción acústica del fruto palta variedad fuerte	62

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Equipos utilizados en el primer, segundo y tercer diseño	73
1.1	Amplificador de poder (1) y excitador de potencia (2)	73
2	Equipos utilizados en el cuarto , quinto y sexto diseño y en ensayo final	74
2.1	Excitador ultrasónico	74
2.2	Medidor de potencia	74
2.3	Frecuencímetro (1) y Transformador de Impedancia (2)	75
2.4	Amplificador (1) y osciloscopio (2)	75
3	Primer y segundo diseño para la determinación del coeficiente de absorción acústica de la palta	76
3.1	Primer diseño	76
3.2	Segundo diseño	76
4	Diseños 3 y 4 para la determinación del coeficiente de absorción acústica de la palta	77
4.1	Tercer diseño	77
4.2	Cuarto diseño	77
5	Quinto y sexto diseño para la determinación del coeficiente de absorción acústica de la palta	78
5.1	Quinto diseño	78
5.2	Sexto diseño	78
6	Conjunto de equipos con los cuales se realizaron los ensayos	79

7	Medición del coeficiente de absorción acústica de la palta	80
8	Estimación lineal para firmeza del fruto en función de su coeficiente de absorción para 144 horas de almacenamiento a 20° C.	81
9	Coeficiente de absorción de ondas de un fruto en función del tiempo de maduración (palta variedad negra de la Cruz)	82
10	Coeficiente de absorción de ondas de un fruto en función del tiempo de maduración (palta variedad fuerte)	83
11	Coeficiente de absorción de ondas de un fruto en función del tiempo de maduración (palta variedad hass)	84

1. INTRODUCCION

Uno de los bienes de producción que ha experimentado un gran crecimiento es el de las exportaciones frutícolas. La gran competencia que presenta esta actividad hace que los métodos no destructivos de clasificación y evaluación de índice de madurez adquieran cada día mayor interés en el desarrollo de la industria agropecuaria.

Los métodos no destructivos para verificar estado de madurez, están en la actualidad adquiriendo una mayor importancia, por el hecho de que disminuyen los costos de muestreo destructivo que la industria tiene que realizar para conocer tiempo de cosecha, tiempo de consumo y madurez óptima de procesamiento.

Uno de los productos que ha resultado más relevante en la actividad agrícola nacional, es la palta común (*Persea americana mill*). Por esta razón puede ser interesante desarrollar un método no destructivo, basado en conceptos físicos, consistentes en la obtención de coeficientes de absorción acústica superficial del fruto, que permita detectar su estado de madurez.

El campo de la acústica, en relación con los productos alimenticios hoy en día, no es de utilización mayoritaria, por lo que diseñar apropiadamente un equipo acústico, que permita obtener los resultados adecuados resulta de interés.

Por los cambios en las características de maduración del fruto, como la textura, es pertinente realizar experiencias acústicas, que logren entregar conocimiento del estado evolutivo de madurez sin tener que incurrir en gastos por destrucción.

Por lo anteriormente señalado se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general: Estudiar la factibilidad de desarrollo de un método no destructivo basado en la teoría de absorción acústica para identificar el estado de madurez en palta (*Persea americana mill*).

Objetivos específicos: Diseñar y construir un equipo que permita medir el coeficiente de absorción acústica superficial de la palta.

Medir el coeficiente de absorción acústica superficial de la palta en diferentes estados de madurez y comparar los resultados obtenidos con un método de uso rutinario.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Principios físicos y fundamentos de acústica

2.1.1 Ondas mecánicas. Una manera simple de representar un medio material es imaginar que toda la sustancia está constituida por una serie de resortes de constante de restitución k los cuales enlazan pequeñas masas M. Si se perturba la materia, es decir, si se desplaza una de las masas M, al liberarla esta volverá a su posición inicial, la deformación tardará un tiempo en llegar a la siguiente masa sacándola de su posición de equilibrio (FIGURA 1). Esta perturbación que se propaga en un medio material es lo que se le denomina una onda mecánica. Entonces, una onda mecánica describe una perturbación localizada inicialmente en un punto que se propaga con una velocidad finita en el espacio que contiene un medio material (PETTORINO, 1998).

Esta propagación no lleva consigo un movimiento de conjunto del medio material, sino que supone solamente una transmisión de energía a través del mismo; ejemplos comunes de ello lo constituyen las ondas sonoras y las ondas ultrasónicas.

2.1.2 Elementos que caracterizan una onda. Las magnitudes que caracterizan una onda según PETTORINO (1998), son:

- El periodo (T): es el tiempo en que cada partícula efectúa una oscilación completa.

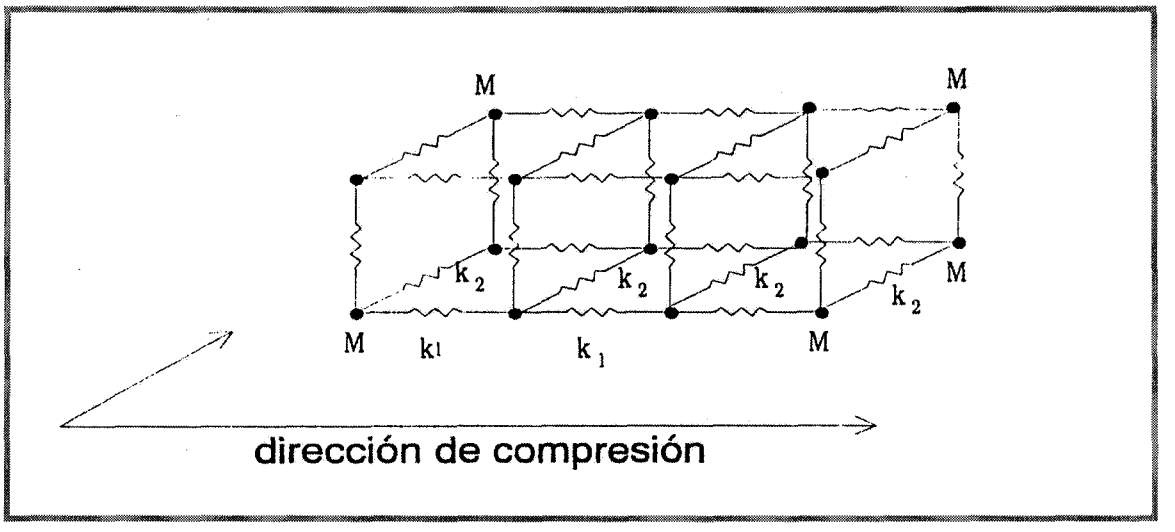


FIGURA 1. Modelo mecánico.
FUENTE: PETTORINO (1998).

- La frecuencia (f): es el número de oscilaciones efectuadas en una unidad de tiempo. También puede decirse que es el número de ciclos que se completan en la unidad de tiempo. La frecuencia se mide en *Hertz*. (Hz). Un fenómeno tiene la frecuencia de 1 Hz, cuando cumple un ciclo completo en un segundo.

- Longitud de la onda (λ): es la distancia que se propaga la onda durante un periodo.

- Amplitud de onda: es el mayor valor que toma el parámetro que la describe (densidad, presión acústica, velocidad de vibración, etc.), a partir de su valor de equilibrio. Si se trata de amplitud de desplazamiento, ésta es la elongación máxima, es decir, la mayor distancia que separa una partícula de su posición de equilibrio.

2.1.3 Ondas ultrasónicas. Las ondas de frecuencia superior al límite de audición del oído humano (20kHz) se denominan *ondas ultrasónicas*. Debido al

pequeño valor de su longitud de onda, éstas son apropiadas para la investigación de las propiedades físicas de la materia (PETTORINO, 1998).

2.2 Ondas planas en un fluido

2.2.1 Principio de ondas planas en un fluido. SEARS (1965), planteó que un fluido (líquido o gas) encerrado en un tubo de sección constante A y paredes rígidas puede constituir un dispositivo especialmente adecuado para producir ondas planas. Esto se consigue situando un pistón oscilante en un extremo del tubo y un absorbente en el otro (FIGURA 2).

La FIGURA 2 muestra un elemento de fluido que en ausencia de una perturbación se encuentra entre los planos x y $x+\Delta x$. Cuando se propaga una onda a lo largo del tubo, la cara izquierda del elemento se desplaza una longitud ξ y la derecha una longitud $\xi+\Delta\xi$..

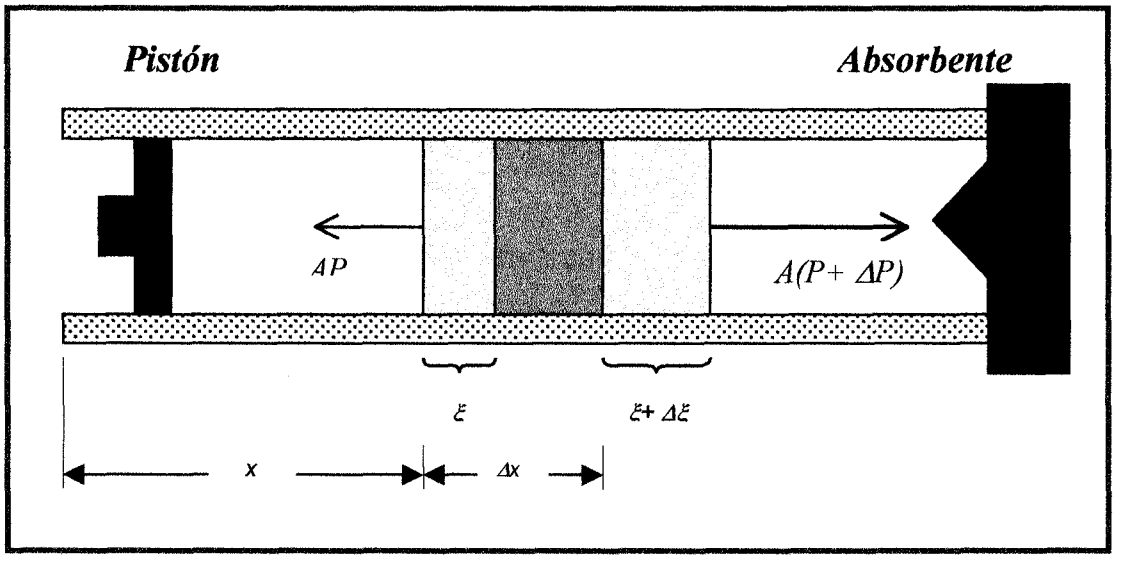


FIGURA 2. Impulso de compresión en un fluido encerrado en un tubo.

FUENTE: SEARS (1965).

SEARS (1965), representó como P_0 la presión en el fluido no perturbado, P la presión en la cara izquierda del elemento desplazado y $P+\Delta P$ la presión en su cara derecha. También despreció la pequeña diferencia de presión entre las caras externas cuando se relaciona el cambio de volumen del elemento con sus propiedades elásticas y suponer que la presión ha aumentado desde P_0 hasta P. Para simplificar, este exceso de presión la representó como p,

$$p = P - P_0 \tag{2.1}$$

El volumen inicial del elemento era $A\Delta x$ y su variación de volumen cuando se ha desplazado es $A\Delta\xi$. Entonces, de la definición de módulo de compresibilidad B del fluido,

$$p = -B \frac{\Delta \xi}{\Delta x} \tag{2.2}$$

Y en el límite cuando Δx y Δz tienden a cero,

$$p = -B \frac{d \xi}{d x} \tag{2.3}$$

Al escribir la expresión de la aceleración del elemento, no puede despreciarse la diferencia de presión entre sus caras extremas. La fuerza sobre su cara izquierda es AP y sobre su cara derecha es $A(P+\Delta P)$.

De acuerdo a SEARS (1965), la fuerza neta, dirigida hacia la izquierda, es $-A\Delta P = -A\Delta p$. La variación ΔP del exceso de presión puede escribirse

$$\Delta p = \frac{d\,p}{d\,x}\,\Delta x \tag{2.4}$$

Pero, según la ecuación (2.3),

$$\frac{d\,p}{d\,x} = -\,B\,\frac{d^2\xi}{d\,x^2} \tag{2.5}$$

es decir

$$-\,A\,\Delta p = A\,B\,\frac{d^2\xi}{d\,x^2}\,\Delta x \tag{2.6}$$

La masa Δm del elemento es igual al producto de su densidad ρ_0 en el estado no perturbado, cuando la presión es P_0, por el volumen inicial $A\Delta x$. La aceleración es de $d^2\xi / d\,t^2$. Entonces, según la segunda ley de Newton,

$$A\,B\,\frac{d^2\xi}{d\,x^2}\,\Delta x = \rho_0 A\,\Delta x\,\frac{d^2\xi}{d\,t^2} \tag{2.7}$$

o bien

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = \frac{B}{\rho_0} \frac{d^2\xi}{dx^2}$$

(2.8)

que tiene la misma forma que la ecuación diferencial para ondas planas en una varilla y para ondas transversales en una cuerda. La velocidad de propagación es, por consiguiente,

$$c = \sqrt{B / \rho_0}$$

(2.9)

Cuando se propagan ondas planas en un fluido contenido en un tubo, la temperatura en un punto cualquiera aumenta o disminuye a la vez que el material es alternativamente comprimido o alargado. El flujo calórico es un proceso tan lento que en la mayor parte de los casos no llega a alcanzar el equilibrio de temperatura. Entonces, el módulo de compresibilidad B es muy aproximadamente lo que se obtendría en un proceso adiabático (SEARS,1965).

El módulo de compresibilidad adiabático B de un gas perfecto es

$$B = \gamma P$$

(2.10)

siendo γ la razón de los calores específicos a presión constante y a volumen constante, Cp / Cv, y P la presión absoluta. Para el aire, γ = 1.41 y en condiciones normales P = 1 (atm) = 1.013 $*$ 10^{-6} (dinas / cm^2), ρ_0 = 1.29 $*$ 10^{-3} (gr / cm^3). La velocidad calculada para las ondas de compresión es

$$c = \sqrt{B / \rho_0} = \sqrt{\gamma P / \rho_0} \tag{2.11}$$

$$= 34400 \frac{cm}{seg} = 344 \frac{m}{seg}$$

que está en excelente concordancia con la velocidad medida.

La respuesta del oído a las ondas sonoras depende de las variaciones del exceso de presión p, más que de los cambios en el desplazamiento ξ. Algunos tipos de micrófono también son excitados por presión. Es, por tanto, útil con frecuencia considerar la onda como una *onda de presión* en lugar de una *onda de elongación* (SEARS, 1965) . Para obtener la ecuación diferencial de una onda de presión, se deriva primero la ecc. (2.3) dos veces con respecto a t, obteniendo

$$\frac{d^2 p}{dt^2} = -B \frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{d\xi}{dx}\right) = -B \frac{d^3\xi}{dt^2 dx} \tag{2.12}$$

La eliminación de $d^2\xi / dx^2$ entre las ecc. (2.4) y (2.5) se obtiene

$$\frac{d\,p}{d\,x} = -\rho_0 \frac{d^2\xi}{d\,t^2}$$

(2.13)

Por tanto

$$\frac{d^2 p}{d\,x^2} = -\rho_0 \frac{d}{d\,x}\left(\frac{d^2\xi}{d\,t^2}\right) = -\rho_0 \frac{d^3\xi}{d\,x\;d\,t^2}$$

(2.14)

Se demuestra en los libros de calculo diferencial que, para funciones continuas, las llamadas derivadas *mixtas* de tercer orden de ξ no dependen del orden de derivación. Esto es,

$$\frac{d^3\xi}{d\,x\;d\,t^2} = \frac{d^3\xi}{d\,t^2 dx}$$

(2.15)

Por consiguiente,

$$\frac{d^2 p}{d\,t^2} = \frac{B}{\rho_0}\frac{d^2 p}{d\,x^2}$$

(2.16)

de modo que el exceso de presión p obedece a la misma ecuación diferencial que la elongación ξ.. Se deduce de ello que las ondas pueden considerare o

como *ondas de elongación* o como *ondas de presión* , y que ambas se propagan con una velocidad

$$c = \sqrt{B / \rho_0}$$

(2.17)

Debido a que el exceso de presión es proporcional a la derivada de la elongación respecto a la distancia (véase en ecc. 2.3), la onda de presión está desfasada 90º respecto a la onda de elongación; por ejemplo, si la elongación está representada por una onda senusoidal de amplitud ξ_0,

$$\xi = \xi_0 \text{ sen } (k x - \omega t)$$

(2.18)

la onda de presión es

$$p = - B \frac{d \xi}{d x} = - kB \xi_0 \cos (k x - \omega t)$$

(2.19)

que es una onda cosenoidal. En cualquier punto en que la elongación instantánea es nula, la presión es máxima o mínima, y viceversa.

El producto $k B \xi_0$ representa evidentemente el máximo de exceso de presión, es decir la *amplitud de presión*. Para mantener una notación consecuente se debería representar ésta por P, pero para evitar confusión se designará por p_m. La amplitud de presión y la amplitud de elongación ξ están relacionadas por

$$p_m = k B \xi_0$$

(2.20)

y

$$p = - p_m \cos (k x - \omega t)$$

(2.21)

2.2.2 Solución armónica de la ecuación de onda plana. Según KINSLER, (1962), el tipo de solución más importante que expresa el movimiento de partículas de un fluido como función de una onda plana, en forma compleja es

$$\xi = A e^{j(\omega t - k x)} + B e^{j(\omega t + k x)}$$

(2.22)

donde A es la amplitud de desplazamiento compleja de una onda plana, ω es la frecuencia angular de la onda y k es número de onda; la onda se traslada en dirección x positiva con una velocidad c. La amplitud compleja B se refiere a una onda viajando en dirección x negativa.

Se definirán otras variables acústicas, tales como presión acústica p y velocidad de partícula $\boldsymbol{u}$, que serán útiles para la resolución de la hipótesis de trabajo en capítulos posteriores

$$p = -\rho_0 c^2 \frac{d\xi}{dx} = j \rho_0 c \omega \left(A e^{j(\omega t - k x)} - B e^{j(\omega t + k x)} \right)$$

(2.23)

$$u = \frac{d\xi}{dt} = j\omega\left(Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)} \right)$$

(2.24)

2.3 Impedancia acústica específica

KINSLER, (1962), llamó al cuociente de la presión acústica partido por la velocidad de partícula, *impedancia acústica especifica*, z. Para ondas planas acústicas viajando en dirección x positiva el cuociente está dado por

$$z_+ = \frac{p_+}{u_+} = \frac{j\rho_0 c\omega A e^{j(\omega t - kx)}}{j\omega A e^{j(\omega t - kx)}} = \rho_0 c$$

(2.25)

y para ondas planas acústicas viajando en dirección x negativa es

$$z_- = \frac{p_-}{u_-} = \frac{-j\rho_0 c\omega B e^{j(\omega t + kx)}}{j\omega B e^{j(\omega t + kx)}} = -\rho_0 c$$

(2.26)

La impedancia acústica específica para ondas planas, viajando en cualquier dirección tiene una magnitud real que es $\rho_0 c$. Este producto de dos cantidades, que son propias del medio en el que viaja la onda acústica, tiene por nombre *impedancia acústica característica*. Las unidades para la impedancia acústica específica en el sistema MKS esta dada por *Kilogramos/metros*^{2}*segundos* o *rayl* (KINSLER, 1962).

Aunque la impedancia acústica específica del medio es una cantidad real para ondas acústicas planas, esto no es completamente cierto, ya que para el completo entendimiento de las ondas en general la impedancia acústica específica se encuentra de la forma siguiente

$$z = \frac{p}{u} = r + jx \tag{2.27}$$

donde r es llamada *resistencia acústica específica* y x la *reactante acústica específica* de la onda acústica en movimiento.

De las ecuaciones (2.26) y (2.27) es claro que como se dijo la *resistencia acústica específica* de un medio ilimitado para una onda acústica plana es

$$r = \pm \rho_0 c \quad rayls \tag{2.28}$$

donde el signo positivo es usado para ondas planas acústicas viajando en dirección x positiva y el signo negativo, es para ondas planas acústicas viajando en dirección x negativo. Entonces queda claro que para el tipo de ondas en estudio la *reactante acústica específica* es cero.

2.4 Fenómeno de transmisión

2.4.1 Cambios en el medio. Cuando una onda acústica plana viaja a través de un medio fluido, e impacta con otro continuo a éste, se genera una *onda refractada* en el primer medio y otra *onda transmitida* en el segundo. Las

amplitudes de ondas (*onda refractada* y *onda transmitida*) dependen de las impedancias características de los dos medios y el ángulo de incidencia de la onda que impacta (KINSLER, 1962).

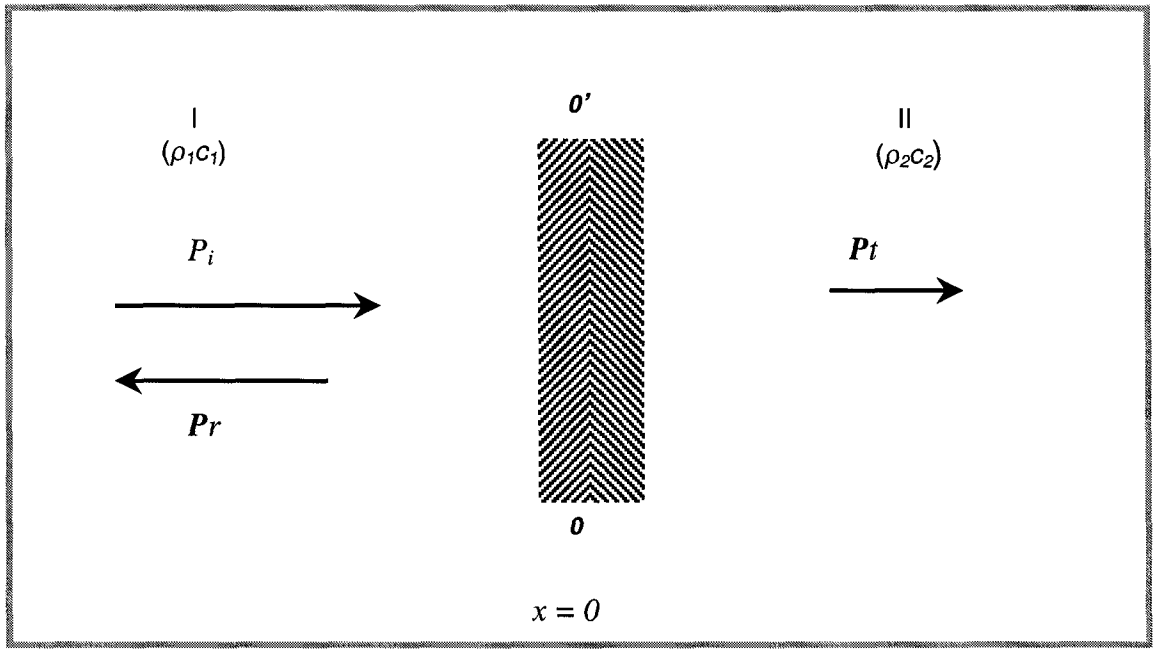


FIGURA 3. Reflexión y transmisión de ondas acústicas planas de un medio a otro.

FUENTE: KINSLER (1962).

2.4.2 Transición de un medio fluido a otro; incidencia normal. La línea *00'* de la FIGURA 3 denota el límite entre dos medios continuos, el medio I, de características de impedancia $\rho_1 c_1$ y el medio II de impedancia $\rho_2 c_2$. Las cantidades ρ_1 y ρ_2 son densidades del medio I y el medio II respectivamente.

La onda acústica que viaja en dirección x positiva por el medio I se denomina *onda incidente* y se representa por

$$p_i = A_1 e^{j(\omega t - k_1 x)}$$

(2.29)

donde A_1 es una constante real que representa la presión acústica de la onda. El impacto de la *onda incidente* en el límite de los dos medios a $x=0$ produce una *onda reflejada* de la forma

$$p_r = B_1 e^{j(\omega t + k_1 x)}$$

(2.30)

y una *onda transmitida*

$$p_t = A_2 e^{j(\omega t - k_2 x)}$$

(2.31)

La *onda transmitida* siempre tiene la misma frecuencia que la *onda incidente*, pero como resultado de la diferencia entre las velocidades(c_1 y c_2) entre los dos medios, los valores de las constantes de longitud de onda en el medio I y el medio II también son diferentes.

Según KINSLER (1962), hay dos condiciones de borde que deben cumplirse en un plano que separa a dos medios para todos los puntos de éste:

- La presión acústica en ambos lados del límite entre dos medios debe ser siempre igual. Esto resulta de la ley que dice que la presión en un fluido es siempre continua.

- La velocidad de partícula en la interface es siempre igual. Esta condición se satisface para que los medios siempre estén en constante contacto.

Debido a que la presión es una magnitud escalar, en cualquier punto del medio su valor será: $p_i + p_r$. Igualando esta expresión a p_t en la frontera se obtiene:

$$A_1 e^{j\omega t} + B_1 e^{j\omega t} = A_2 e^{j\omega t} \tag{2.32}$$

simplificando

$$A_1 + B_1 = A_2 \tag{2.33}$$

Las velocidades de partículas u_i, u_r y u_t pueden ser representadas por

$$u_i = \frac{p_i}{\rho_1 c_1} \quad , u_r = \frac{p_r}{-\rho_1 c_1} \quad y \quad u_t = \frac{p_t}{\rho_2 c_2} \tag{2.34}$$

La velocidad de partícula en el medio I es $u_i + u_r$, y la segunda condición de borde es $u_i + u_r = u_t$ en $x=0$. Sustituyendo en ecuación anterior se obtiene

$$\frac{p_i}{\rho_1 c_1} - \frac{p_r}{\rho_1 c_1} = \frac{p_t}{\rho_2 c_2} \tag{2.35}$$

introduciendo la expresión de presión en $x=0$ se reduce a

$$\rho_2 c_2 (A_1 - B_1) = \rho_1 c_1 A_2 \tag{2.36}$$

Las ecuaciones 2.32 y 2.35 serán combinadas para eliminar A_2 y se obtine

$$B_1 = A_1 \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \tag{2.37}$$

De acuerdo con la ecuación anterior la constante compleja B_1 es ahora una constante real positiva cuando $\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1$ y negativa cuando $\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$.

Cuando la impedancia característica del medio II es más grande que el medio I, el exceso de presión en la *onda incidente* es reflejada como un exceso de presión negativa; ejemplo, una *condensación* es reflejada como *condensación*. En cambio cuando la impedancia característica del medio II es más pequeña que el medio I un exceso de presión en la *onda incidente* es reflejada como un exceso de presión positiva; ejemplo, una *condensación* es reflejada como *rarefacción* (KINSLER, 1962).

En casos límites cuando el cuociente $\rho_2 c_2 \ / \ \rho_1 c_1 \rightarrow \infty$ la *onda reflejada* no presenta desfase y la amplitud del vientre de presión es el doble respecto a la amplitud de la *onda incidente*. Por otro lado cuando el cuociente $\rho_2 c_2 \ / \ \rho_1 c_1 \rightarrow 0$ la *onda reflejada* la amplitud del vientre de presión es igual a la amplitud de la *onda incidente* (KINSLER, 1962).

2.5 Ondas estacionarias en un tubo

Las ondas de compresión que se propagan a lo largo de un tubo de longitud finita se reflejan en sus extremos de manera semejante a como las ondas transversales de una cuerda se reflejan en sus extremos. La superposición de trenes de onda que se propagan en sentidos opuestos, origina en el tubo ondas estacionarias (SEARS,1965).

La onda estacionaria puede ser considerada como una onda de elongación o como una onda de presión. Si la onda de elongación esta dada por

$$\xi = \xi_0 \ \text{sen}\, kx \cos \omega t \tag{2.38}$$

la ecuación de la onda de presión es

$$p = -B \frac{d\xi}{dx} = -Bk\,\xi_0 \cos kx \cos \omega t \tag{2.39}$$

La comparación de estas ecuaciones muestra que los *nodos de elongación* en una onda estacionaria (es decir, los puntos, en que *sen kx = 0*) son los *vientres de presión* (ya que si *sen kx = 0, cos kx = ±1*), y los *vientres de elongación* son los *nodos de presión* (SEARS,1965).

La FIGURA 4 ilustra las ondas estacionarias longitudinales. Las partículas situadas a ambos lados de un nodo de elongación están moviéndose simultáneamente hacia él o alejándose de él, dando origen así a grandes variaciones de presión.

Si la reflexión tiene lugar en el extremo cerrado de un tubo, la onda reflejada ha de ser tal que la elongación en el extremo sea siempre nula. En consecuencia, un extremo cerrado es un *nodo de elongación.* Sin embargo, dado que los puntos de elongación nula son puntos de máxima variación de presión, el extremo es a la vez un *vientre de presión.*

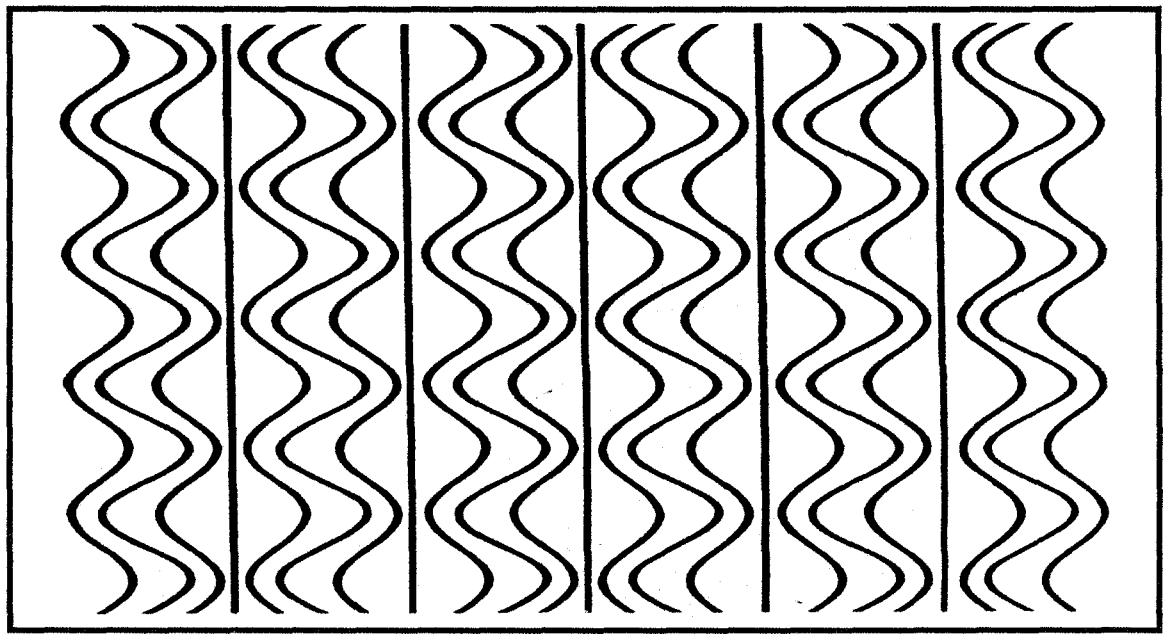


FIGURA 4 Representación de ondas estacionarias longitudinales.
FUENTE: SEARS (1965).

Si el extremo del tubo es abierto, la naturaleza de la reflexión es más compleja y depende de la anchura del tubo en comparación con la longitud de onda del sonido (SEARS,1965).

2.6 Atenuación de las ondas ultrasónicas en los sólidos

Según TAPIA (1995), como consecuencia de la propagación de las ondas en los materiales sólidos y en su interacción con el medio, se da lugar al efecto de atenuación, que se traduce en una debilitación de los ultrasonidos, debido a

dos causas: la dispersión y la absorción, constituyendo ambas, la atenuación (amortiguación y extinción).

La dispersión se debe a que en la práctica los materiales no son estrictamente homogéneos. Contienen superficies limites o entrecaras pequeñas, en las que la impedancia acústica cambia bruscamente, debido a la distinta densidad y velocidad acústica de los materiales, de naturaleza, condición o estados diferentes en dichas entrecaras. Esto es consecuencia de heterogeneidades pequeñas (poros, segregaciones, inclusiones, anisotropía, tamaño de grano, etc.).

La absorción de las ondas ultrasónicas es una conversión directa de la energía mecánica en calor. Produce un efecto de frenado de la oscilación de las partículas. Las causas que dan origen a este fenómeno son diversas y en el influyen, el medio y la frecuencia de las ondas (TAPIA,1995).

2.7 Fundamento de la determinación del coeficiente de absorción acústica

El método para determinar el coeficiente de absorción acústica del fruto, se basó en el establecimiento de una onda estacionaria formada por una fuente acústica (pistón emisor) ubicada en un extremo de un tubo resonante, y la muestra bajo examen en el otro (GAETE y OYARZUN,1985).

Según GAETE y OYARZUN (1985), el tubo debe tener paredes suficientemente rígidas para que no admita vibraciones laterales, además debe seleccionarse de tal modo que su radio cumpla con la condición:

$$kr < 1.841 \tag{2.40}$$

donde r es el radio del tubo y $k = 2\pi / \lambda$, el número de onda de radiación del pistón. En estas condiciones el único modo de propagación presente dentro del tubo es el primer modo longitudinal.

Si el pistón emisor emite ondas armónicas simples en $x = 0$, éstas se propagan a lo largo del tubo en la dirección $P(x,t)$ positiva de x. Por otra parte las ondas reflejadas en la superficie de la palta se propagan en la dirección negativa de x (BERANEK, 1959). Entonces, la presión acústica en cualquier punto x e instante de tiempo t está dada por la expresión:

$$P(x,t) = Ae^{i(kx-\omega t)} + Be^{-i(kx+\omega t)} \tag{2.41}$$

como es habitual, $k = 2\pi / \lambda$, $\omega = 2\pi f$; A y B son dos constantes, en general complejas. La ecuación (2.41) caracteriza la naturaleza de la onda estacionaria formada en el interior del tubo.

El número de onda k' es real siempre que las paredes del tubo sean completamente rígidas y no exista absorción durante la propagación de la onda. Si por el contrario existe absorción o las paredes responden elásticamente a las solicitaciones, la constante k' será compleja, así:

$$k = k' + i\pi\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} + i\pi\gamma \tag{2.42}$$

donde $\gamma < 1$ corresponde al factor de atenuación de onda. Como es bien sabido la impedancia acústica especifica $Z(x,t)$ de un material está relacionado con su

coeficiente de absorción. Este parámetro relaciona la presión acústica $p(x,t)$, en un plano del medio con la velocidad de la partícula $u(x,t)$:

$$Z(x,t) = \frac{p(x,t)}{u(x,t)} \tag{2.43}$$

Usando la expresión (2.41) para p y la relación conocida para ondas armónicas:

$$u(x,t) = \frac{1}{i\omega\rho}\frac{\partial p}{\partial x} \tag{2.44}$$

$Z(x, t)$ se puede escribir como:

$$Z(x,t) = \rho c \frac{Ae^{ikx} + Be^{-ikx}}{Ae^{ikx} - Be^{-ikx}} \tag{2.45}$$

Es posible simplificar el tratamiento para determinar la parte real e imaginaria de $Z(x, t)$ realizando algunas consideraciones algebraicas. En efecto, si se reemplaza:

$$A = 1/2\, C e^{\theta_0} \quad , \quad B = 1/2\, C e^{-\theta_0} \tag{2.46}$$

se tiene:

$$Z(x,t) = \rho\ c\ \frac{\cosh\ (ikx + \theta_0)}{\text{senh}\ (ikx + \theta_0)}$$

(2.47)

es decir:

$$Z(x,t) = \rho\ c \coth\left(ikx + \theta_0\right)$$

(2.48)

Resulta conveniente expresar esta cotangente hiperbólica como la tangente hiperbólica de $\pi(\alpha - i\beta)$.Esta transformación permite obtener relaciones gráficas entre α y β con parte real e imaginaria de la tangente hiperbólica, respectivamente. Además, α y β resultan ser funciones lineales de x .

Si se reemplaza la expresión de k en (2.48), teniendo presente lo manifestado anteriormente, se puede escribir:

$$Z(x,t) = \rho\ c \coth\left(\theta_0 - \pi\,\gamma\,x + i\,(2\pi/\lambda)x\right) =$$

$$= \rho\ c\ tanh\ \pi\left(\alpha_x + i\beta_x\right)$$

(2.49)

Usando la relación $coth\ x = tanh\ (x + i\pi/2)$ se encuentra que α y β son funciones lineales de x, tal como fue indicado:

$$\alpha_x = -\gamma\,x + \theta_0/\pi$$

$$\beta_x = -2x/\lambda + 1/2$$

(2.50)

Evaluando 2.50 para $x= 0$ y $x= l$ se deduce

$$\alpha_0 = \alpha_l + \gamma\, l$$
$$\beta_0 = \beta_l + 2l/\lambda$$

(2.51)

es decir que α_0 y β_0 quedan determinadas por el comportamiento del material en $x= l$. La reacción del material en ($x= l$) se mide por la razón entre las amplitudes de la onda reflejada e incidente, y por el cambio de fase entre ellas. Para todo x y t, se tiene:

$$P_i = 1/2C\, e^{i(kx-\omega t)+\theta_0}$$
$$P_r = 1/2C\, e^{-i(kx+\omega t)+\theta_0}$$

(2.52)

y de la ecuación 2.10, para $x= l$, resulta:

$$\coth\left(\theta_0 - \pi\gamma\, l + i\,(2\pi/\lambda)l\right) =$$
$$= \coth\left(\pi(\alpha_l - i\beta_l) - i\pi/2\right) =$$

(2.53)

de donde

$$\theta_0 = \pi\left(\alpha_l + \gamma l\right) - i\pi\left(\beta_l + 2l/\lambda + 1/2\right)$$

(2.54)

Reemplazando θ_0 y k, se encuentra para la razón entre la amplitud reflejada y la amplitud incidente, en $x = l$:

$$\frac{\left|P_r\right|}{\left|P_i\right|} = e^{-2\pi\alpha_l}$$

(2.55)

y el cambio de fase en la reflexión es:

$$\Delta\varphi = \pi\left(2\beta_l + 1\right)$$

(2.56)

de (2.55) queda en evidencia que α_l representa el coeficiente de absorción acústica superficial del material colocado en $x = l$, y de (2.56) que β_l representa el cambio de fase proveniente de la admitancia característica del material.

Usando las relaciones (2.51) se podría calcular la reacción del fluido sobre el pistón:

$$Z_0 = \rho c \coth \theta_0 = \rho c \tanh \pi\left(\alpha_0 - i\beta_0\right)$$

$$= \rho c \tanh \pi\left[\left(\alpha_l + \gamma l\right) - i\left(\beta_l + 2l/\lambda\right)\right]$$

(2.57)

De (2.41) y (2.48) resulta que la presión dentro del tubo puede expresarse como:

$$P(x,t) = Ce^{-i\omega t} \coth\left(ikx + \theta_0\right)$$

(2.58)

A una distancia *"d"* medida desde la muestra en $x = l\text{-}d$ como se muestra en la FIGURA 5, esta expresión toma la forma:

$$P(x,t) = Ce^{-i\omega t} \coth\left(ikd - \theta_l\right)$$

(2.59)

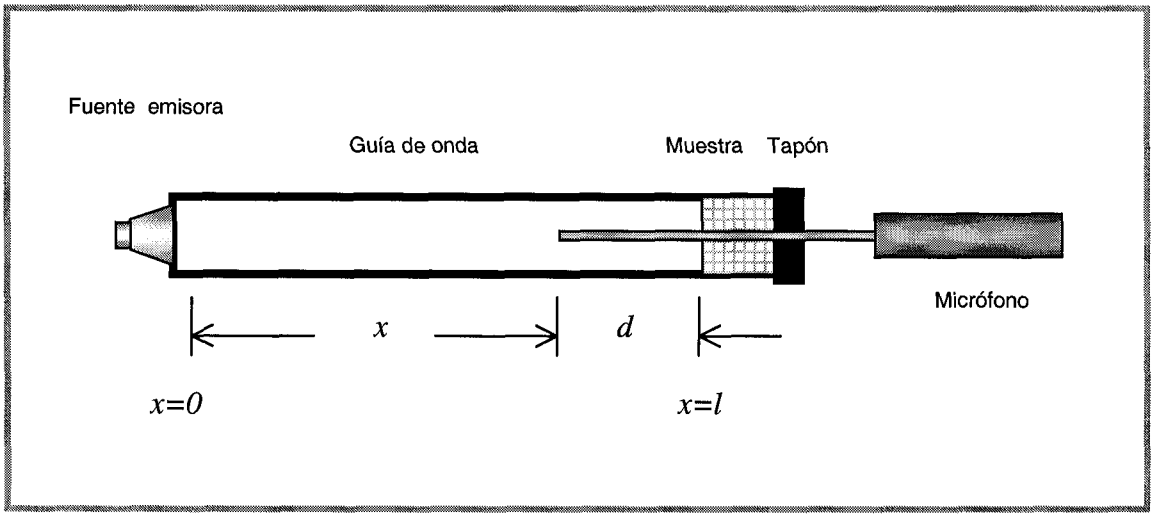


FIGURA 5. Esquema del sistema para medir el coeficiente de absorción acústica de materiales.

FUENTE: GAETE y OYARZUN (1985).

donde

$$\theta_l = ikl - \theta_0 = \pi\alpha_l - i\pi\left(\beta_l + 1/2\right)$$

(2.60)

Por lo tanto, se tiene que:

$$\left|P_{(d)}\right|^2 = \left|C\right|^2 \left|\coth^2\left(ikd - \theta_l\right)\right| \qquad (2.61)$$

Reemplazando las expresiones para θ_l, k y calculando $cosh^2\,(ikd - \theta_l)$ se obtiene:

$$\left|P_{(d)}\right|^2 = \left|C\right|^2 \left|\coth^2 \pi\left(\alpha_l + \gamma d\right) - \cos^2 \pi\left(\beta_l + 2d/\lambda\right)\right|$$

(2.62)

Los mínimos de esta expresión se producen a distancias medidas desde el material en $x = l\text{-}d$ que son dados por los valores de "d" para los cuales:

$$\left(\beta_l + \frac{2d_{min}}{\lambda}\right) = \pm n$$

(2.63)

es decir:

$$d_{min\,(n)} = \lambda/2\left(n - \beta_l\right)$$

(2.64)

donde n es un número entero. Por lo tanto, la presión acústica mínima resulta ser:

$$p_{min\ (n)} = C \ \text{senh} \ \pi \left[\alpha_l + \lambda\gamma \ / 2\left(n - \beta_l\right)\right]$$

(2.65)

Análogamente, las presiones acústicas máximas se obtienen a d_{max} tales que:

$$d_{max\ (n+1/2)} = \lambda \ / 2\left(n + 1/2 - \beta_l \right)$$

(2.66)

y la presión máxima acústica resulta ser:

$$p_{max\,(n+1/2)} = C \cosh \pi \left[\alpha_l + \lambda\gamma \ / 2\left(n + 1/2 - \beta_l\right)\right]$$

(2.67)

El valor del factor γ (factor de atenuación de onda), lo determinaron GAETE y OYARZUN (1985) en función de la presión entre dos mínimos sucesivos n y $n+1$ y el máximo intermedio $(n + 1/2)$.

$$\frac{P_{min\ (n)} - P_{min\ (n+1)}}{P_{max\ (n+1/2)}} = 2 \ senh\ (\pi\gamma\lambda / 4)$$

(2.68)

Para determinar α_l (coeficiente de absorción de la palta), GAETE y OYARZUN (1985) calcularon el valor promedio de la presión mínima en dos mínimos sucesivos dividida por la presión máxima entre ellos.

$$\frac{P_{min(n)} + P_{min(n+1)}}{2P_{max(n+1/2)}} = cosh\,(\pi\gamma\lambda/4)\, tanh\,\pi(\alpha_l + \gamma d_{(n+1/2)})$$

(2.69)

2.8 La palta (*Persea americana mill*)

2.8.1 Caracterización general del fruto palta. Las primeras noticias de esta especie se tienen a través de estudios arqueológicos que indican su presencia en México hacia el año 8000 antes de Cristo y en Perú hacia 3000-4000 antes de Cristo (WILLIAMS, 1976). Su área de origen no es conocida con precisión dada las existencia de varias poblaciones silvestres, pero se considera como tal la región comprendida entre el Sur de México y Colombia, a lo largo de América Central (POPENOE, 1963).

La clasificación botánica de la palta presenta algunas controversias, reconociéndose una, dos o tres especies según los autores. Actualmente se acepta que la mayoría de las paltas pueden agruparse bajo una sola especie: *Persea americana Mill.* El género *Persea* pertenece a la familia de las lauráceas, existiendo alrededor de 50 especies del mismo (CHANDLER, 1958).

Por otro lado, la *Persea americana Mill* puede ser dividida a efectos prácticos en tres razas hortícolas: antillana, guatemalteca y mexicana (POPENOE, 1976).

2.8.2 Aspectos económicos del fruto. Si se analizan las cifras de los últimos tres años entregadas por ODEPA (Oficina de Estudios Políticas y Agrarias), sólo en el año 1998 se produjeron alrededor de 99.000 toneladas en huertos industriales, abarcando una superficie de 18.330 hectáreas plantadas siendo ésta la tercera en importancia luego de las uvas de mesa y manzanas . Además

Chile actualmente ocupa el cuarto lugar de producción de palta en el mundo (ODEPA, 2000). [1]

Debido a la información anterior, el estudio a realizar con este fruto adquiere mayor interés tanto en lo científico como comercial.

2.8.3 Crecimiento y desarrollo del fruto. El fruto es un sistema bastante complejo y esta formado por tejido que se encuentra metabolizando activamente (PANTASTICO, 1979). En muchas especies, el crecimiento de los frutos está dado principalmente por la elongación celular, ya que la división celular ocurre en un periodo corto.

La división celular en el fruto de palto continúa mientras éste permanezca en el árbol, siendo rápida en frutos jóvenes y lenta en frutos maduros (BLUMENFELD y GAZIT, 1974).

El pericarpo, que corresponde a la porción comestible del fruto, está formado por un grueso mesocarpo y un endocarpo con dos o tres capas de pequeñas células. Por otro parte, las células del mesocarpo poseen un diámetro que alcanza los 55 a 60 micrones (BLUMENFELD y GAZIT, 1974).

2.8.4 Composición del fruto. En el CUADRO 1 aparecen los principales componetes de la palta.

La palta es un fruto con un alto contenido de aceite, entre un 15 y 22%, y los ácidos grasos que la constituyen en su mayoría corresponden a los llamados esenciales (ESTEBAN, 1993). Su pulpa es rica en ácido oleico, palmítico, linolénico y palmitoleico; contiene además, pequeñas trazas de ácido esteárico.

. [1] CHILE, OFICINA DE ESTUDIOS Y POLITICAS AGRARIAS, SEP , 2000, www.minagri/odepa.cl

También los niveles de proteína son bastante altos, los aminoácidos principales son: glutamina y ácido glutámico. También se han detectado: serina, treonina, alanina, valina y cisteina.

CUADRO 1. Composición química de la palta.

Componentes	Porcentaje
Lípidos	15 - 22 %
Proteínas	0,8 - 2,4 %
Hidratos de carbono	2,9 - 12,2 %
Minerales	0,5 - 1,7 %
Vitamina A	370 - 870 UI/100g de aceite
Vitamina complejo B:	
Riboflavina	0,08 - 0,16 mg/100g de aceite
Acido pantoténico	0,78 - 1,20 mg/100g de aceite
Acido fólico	0,02 - 0,10 mg/100g de aceite
Niacina	1,05 - 2,42 mg/100g de aceite
Vitamina C	4 - 13 mg/100g de aceite

FUENTE: HUMAN (1987).

Por otra parte, los hidratos de carbono presentes en el mesocarpo corresponden a alcoholes y azúcares poco comunes como: peseitol, d-eritro-d-galacto-heptosa, d-eritro-galactomanulosa; además de glucosa, fructosa y sucrosa. También es necesario tener presente que la composición del fruto cambia según la variedad y la localidad donde éste se desarrolle (GARDIAZABAL y ROSENBERG, 1991).

2.8.5 Valor nutritivo del fruto. La palta es un fruto que posee un alto valor nutritivo, señalándose incluso que posee un valor energético más alto que la banana y la carne (Pierse, citado por LUZA, 1981).

A diferencia de otras frutas frescas, la palta contiene un alto porcentaje de aceite y no requiere una elaboración previa para ser consumida, ya que es digerida por el organismo con mucha facilidad; además que proporciona más calorías que la carne (GARDIAZABAL y ROSENBERG, 1991).

2.8.6 Maduración y cosecha. La palta es un fruto que no alcanza su fase climatérica, esto significa que no alcanza su madurez de consumo mientras permanece en árbol. La mayoría de las variedades comerciales pueden permanecer en árbol sin abcisionar y caer posteriormente. De hecho, salvo para aquellos cultivares que cambian de color, es difícil determinar la madurez visualmente. Esta característica puede ser ventajosa, al pensar que se puede acomodar la cosecha a las necesidades del mercado, pero también puede presentar problemas, como son tanto la recolección temprana o demasiado tardía. Lo primero pudiera implicar la presencia de una fruta con bajo contenido de aceite, presencia de fibra o aspecto arrugado. Por otro lado, una cosecha tardía, involucra una corta vida comercial, un excesivo contenido de aceite y germinación de la semilla (IBAR, 1986).

Por otra parte se señala que al prolongar la fecha de cosecha, la firmeza de la fruta al momento de la recolección es baja y la tasa de ablandamiento durante el almacenamiento es rápida, comparada con las cosechas tempranas (ZAUBERMAN **et al.,**1986).

La fruta solo madura y ablanda después de cosechada, desarrollando buena calidad comestible. La maduración puede tomar de siete días a 27ºC hasta un mes a 5ºC (JACKSON, 1986).

También es importante considerar que el estado de madurez al cosechar es crítico para que se pueda almacenar con éxito la fruta y, por su parte, la madurez optima para la recolección depende mayoritariamente de la longitud del periodo que se piense almacenar (PANTASTICO, 1979).

2.8.7 Indices de madurez. La mayoría de los estándares de madurez dependen del cambio en la concentración de un componente de la fruta, ya que su incremento o disminución se correlaciona con un determinado sabor y aceptación de ésta; con ello se puede predecir el tiempo en que ésta madura (YOUNG y LEE, 1978).

Para determinar si el fruto de palto está comercialmente maduro, se han adoptado diversos parámetros en diferentes países, entre los cuales se pueden señalar los siguientes:

Materia seca. Este parámetro es de fácil utilización, ya que guarda relación entre el aumento del porcentaje de materia seca del producto, la disminución de humedad y el contenido de aceite en aumento. En países como Israel y España tienden a considerar un porcentaje mínimo del 20% de materia seca promedio para cosechar en la mayoría de las variedades comercializadas (IBAR, 1986).

Contenido de aceite. Para este método se utiliza el porcentaje de aceite que contiene la pulpa al desprenderla del árbol, ya que el grado de madurez está relacionado con la fecha de cosecha; es así como, si ésta es muy temprana, el fruto posee una cantidad insuficiente de aceite para alcanzar la madurez de consumo (IBAR, 1986). Por otro lado se señala que a medida que el fruto se desarrolla, existe un incremento substancial del contenido de aceite y atributos de sabor, a su vez, cada cultivar presenta curvas características (OLAETA **et al.,**1986).

En la mayoría de los países que consumen el fruto palta se utiliza este método para establecer el estado de madurez, es por eso que han desarrollado contenidos mínimos y óptimos de porcentaje de aceite para cada variedad, tal como se muestra en el CUADRO 2.

Resonancia Magnética Nuclear: de acuerdo con los estudios que se hicieron con (RMN) tanto la intensidad, la relación del aceite y los picos de resonancia del agua de una dimensión del espectro, se correlaciona con la madurez del fruto (CHEN **et al.**,1993).

CUADRO 2. Contenidos en aceites en diversos cultivares y países.

País	Cultivar	Contenido mínimo	Contenido óptimo
California	Todos	8%	
Africa del Sur	Fuerte		12%
Israel	Fuerte		12%
	Ettinger	9%	
	Pinkerton	9%	
Australia	Fuerte, Edranol Zutano, Rincón	15%	
	Hass	10%	
Nueva Zelanda	Fuerte	13%	16%

FUENTE: GAILLARD (1987).

Firmeza. MIZRACH y FLITSANOV (1998), obtuvieron curvas de estado de madurez en periodos determinados de almacenamiento de palta variedad fuerte. Además en estudios posteriores usan este sistema como método patrón para contraponerlo contra otros experimentos de medición.

La firmeza del fruto palta decae en una tasa moderada en un comienzo del periodo de madurez, luego disminuye notablemente (ZAUBERMAN y FUCHS, 1981). Esta tasa de decaimiento puede apreciarse perfectamente en el CUADRO 3.

Estudios han mostrado que la firmeza de la palta tiene buena correlación con el estado de madurez y su contenido de aceite (LEWIS, 1978).

CUADRO 3. Promedio y desviación estándar de firmeza de paltas almacenadas en un periodo de 11 días, a una temperatura de 5°C.

Tiempo (hrs.)	Número de frutas	Promedio de firmeza (Newton)	Desviación estándar de firmeza
24	28	90,14	4,02
48	64	89,18	5,78
72	93	81,31	9,71
96	107	76,35	7,45
120	94	70,05	11,06
144	87	61,25	8,70
168	112	53,42	13,83
192	119	38,25	13,08
216	90	37,94	14,27
240	49	11,48	7,24
264	13	8,94	2,64

FUENTE: MIZRACH y FLITSANOV (1998).

La firmeza en el fruto palta es un muy buen patrón para establecer el estado de madurez en el fruto en periodos de almacenamiento. La clasificación de la palta de acuerdo a su firmeza es apropiada para su posterior distribución en el mercado (ZAUBERMAN y FUCHS, 1973).

El control de la firmeza es muy importante, ya que una pequeña cantidad de frutos maduros en un lote de paltas recién cosechadas, podría desencadenar una alta taza de ablandamiento de los frutos a comercializar. Esta reacción se

produce por la concentración de etileno en el medio (ZAUBERMAN y FUCHS, 1973).

Es imposible que una persona pueda distinguir la madurez de la palta sin destruirla. Generalmente para estos casos de determinación de madurez de una palta se utiliza un instrumento llamado penetrómetro. Entonces para no destruir el fruto, resulta interesante el estudio de un método no destructivo para la detección de madurez (ZAUBERMAN y FUCHS, 1973).

Cabe destacar que todos los parámetros de madurez antes mencionados son destructivos, es decir, se debe destruir el fruto para obtener el grado de madurez. También es adecuado puntualizar que la mayoría de estos análisis para verificar estado de madurez son engorrosos, peligrosos y difíciles de realizar (BERG, 1989).

2.8.8 Características generales de la palta variedad fuerte. Según CHILE, CORPORACION DE FOMENTO DE LA PRODUCCIÓN (1984) ésta variedad tiene su localización entre la IV y la VI región de Chile. Su época de cosecha va desde fines de mayo hasta noviembre. Sus características son: color verde oscuro, tamaño grande, piel lisa, de forma piniforme, pulpa blanco amarillenta, buen contenido de aceite, firme, con textura suave y de semilla pequeña. Esta variedad se puede apreciar en la FIGURA 6.

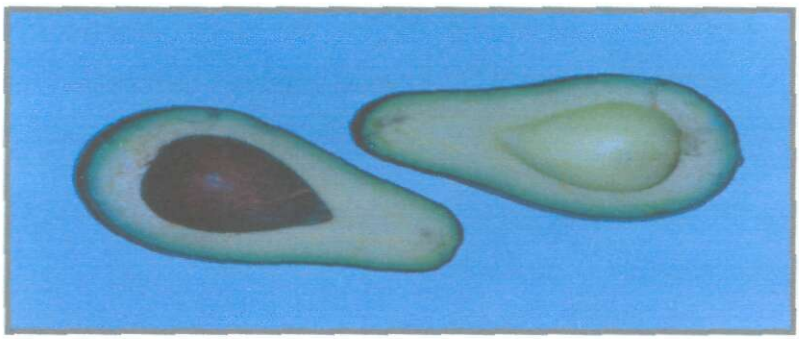


FIGURA 6. Palta variedad fuerte.

2.9 Otros antecedentes relevantes

En la actualidad se han realizado algunos trabajos en alimentos utilizando ultrasonido, de los cuales se destaca los siguientes:

- SELF **et al.** (1994), observó que durante la maduración de la palta fuerte, a 15ºC, la fracción de volumen del espacio intercelular, es decir, el contenido de aire, tiende a disminuir y está relacionado negativamente con la densidad de la pulpa. A su vez, la velocidad ultrasónica está correlacionada positivamente con la humedad de la pulpa.

- Las características de vibración sónica en frutos y vegetales, están gobernados por su módulo elástico (firmeza), masa y geometría. Así es posible evaluar firmeza de frutas y vegetales, en base a sus características de vibración. En este sentido ABBOTT **et al.** (1968), encontraron una alta correlación entre frecuencias resonantes con firmeza y tamaño del fruto.

- MIZRACH y FLITSANOV (1998), recientemente han publicado un método para la realización de ensayos no destructivos en palta. El método consiste en la medida de atenuación y velocidad de propagación en el medio a 50 KHz mediante la técnica del uso de transductores, emisor y receptor. El trabajo desarrollado presenta ciertas complicaciones originadas por el acoplamiento de los transductores y además del uso del carozo como elemento reflector para realizar las mediciones.

3. MATERIAL Y METODO

3.1 Ubicación de los ensayos

El montaje, pruebas y ensayos se realizaron en el laboratorio de ultrasonido del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Santiago de Chile.

3.2 Materia prima

Para establecer la viabilidad del método se experimentó inicialmente (fase previa) con cuatro materiales (espuma moltopren, espuma poliuretano expandido, madera (pino) y bronce). Una vez establecida la posibilidad de realizar las mediciones se procedió a los ensayos con palta.

También se realizaron pruebas de absorción acústicas con diferentes variedades de palta para un período determinado de almacenamiento.

Para las pruebas de absorción acústicas con diferentes variedades de palta se marcó y midió el coeficiente de absorción acústica de cada una en cuatro diferentes puntos ecuatoriales, según lo descrito por MIZRACH y GALILI (1996).

El objetivo de estos ensayos fue elegir la variedad de palta más adecuada para ser utilizada en el experiencia final. Los detalles de estas pruebas aparecen en los ANEXOS 9, 10 y 11.

3.2.1 Característica del fruto utilizado. Las paltas variedad fuerte, que se utilizaron en el estudio fueron cosechadas el 8 de septiembre y elegidas de modo que tuvieran un peso, dimensiones, forma y color lo más uniforme posible. Las muestras fueron elegidas en estado inmaduro con el propósito de que maduraran en el proceso de almacenamiento.

Se utilizó palta variedad fuerte, por ser éste un producto de alta demanda en el mercado extranjero, ser Chile uno de los principales países productores y por tener la piel delgada lo que es adecuado a los requerimientos del ensayo.

3.2.2 Materiales usados en el primer y segundo diseño. Los materiales estudiados fueron madera y espuma de poliuretano expandido (material con alto coeficiente de absorción acústica). Las dimensiones de los materiales utilizados fueron: espesor de 2 cm y un diámetro 10,5 cm.

3.2.3 Materiales usados en el cuarto, quinto y sexto diseño. Se utilizaron cuatro diferentes materiales para medir su absorción acústica: espuma moltopren, espuma de poliuretano expandido, madera (pino) y bronce. Para tal efecto se construyeron muestras de volumen y forma estándar de 2 cm de diámetro y de 0,5 cm de espesor, como se muestra en la FIGURA 7.

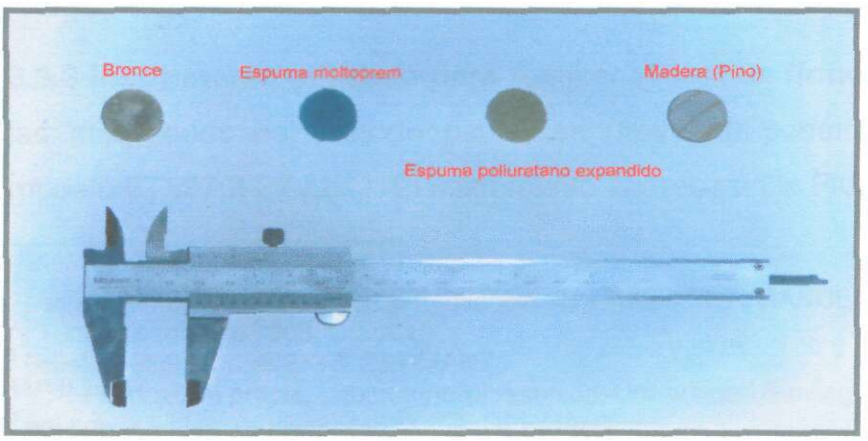


FIGURA 7. Diferentes materiales.

3.3 Equipos utilizados

3.3.1 Equipos utilizados en el primer y segundo diseño. Los equipos que se usaron para este montaje fueron los siguientes:

- Un excitador de potencia[1]
- Osciloscopio [2]
- Amplificador de poder[3]

3.3.2 Equipos utilizados en el cuarto, quinto y sexto diseño; y en la validación final. Para realizar el diseño del equipo se dispusieron de las siguientes unidades:

- Transformador de impedancias [4]
- Potenciómetro[5]
- Excitador ultrasónico [6]
- Osciloscopio[7]
- Frecuencímetro[8]
- Sonda ultrasónica miniatura[9]
- Amplificador de señal ultrasónico de banda ancha[10]
- Fuente de alimentación del amplificador[11]

3.3.3 Instrumento utilizado para realizar el test de firmeza de la palta. Para las mediciones del método patrón se utilizó un penetrómetro marca Veto, modelo FT327(3-27 Lbs.). El instrumento aparece en la FIGURA 8.

---

[1] Lea modeloGMW2Oe, rango de frecuencia 20 a 200000Hz, FRANCE
[2,7] Tectronic modelo 7603, U.S.A.
[3] Brüel & Kjael modelo 2713, GERMANY
[4,9,10,11] Fabricación propia, Laboratorio Ultrasonido, Universidad Santiago de Chile.
[5] eni power sistem modelo EMB2K250, GERMANY
[6] 100 W de potencia, ESPAÑA
[8] Hewlett- Pakard 5314 A, U.S.A

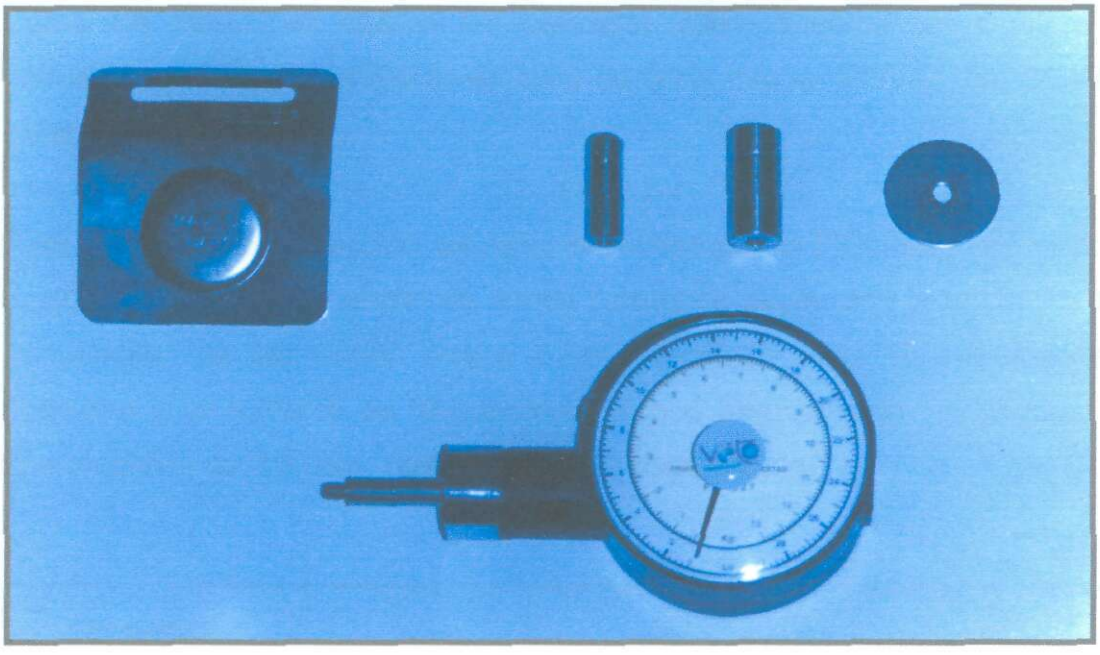


FIGURA 8. Penetrómetro modelo FT327(3-27 Lbs.).

3.4 Desarrollo de los diseños

En el desarrollo de los diseños de los equipos, se utilizó la técnica llamada "de prueba y error".

3.4.1 Desarrollo del primer diseño. En un principio, para la obtención de datos de absorción de materiales similares a los de la literatura se construyó, sobre la base de una línea de transmisión acústica, un equipo experimental (GAETE y OYARZUN,1985). Este consistió en una cámara cilíndrica de fibra de vidrio de 6 mm de espesor, 10,5 cm de diámetro y 60 cm de largo . Además las paredes se construyeron suficientemente rígidas como para que no admita vibraciones laterales. El esquema aparece en la FIGURA 9.

Como los materiales debían ser utilizados como absorbentes a diferentes frecuencias, se usó una fuente emisora de onda marca "NOVIC" de 60 W de potencia.

Para el sistema de detección, tal como se muestra en la FIGURA 9, se utilizó un micrófono con un gran ancho de banda (capaz de captar una gran cantidad de frecuencias) de fabricación propia y con 64 cm de largo. El micrófono está acoplado a un sistema de desplazamiento que permite medir longitudes con una precisión de 0,5 mm., registradas en el osciloscopio.

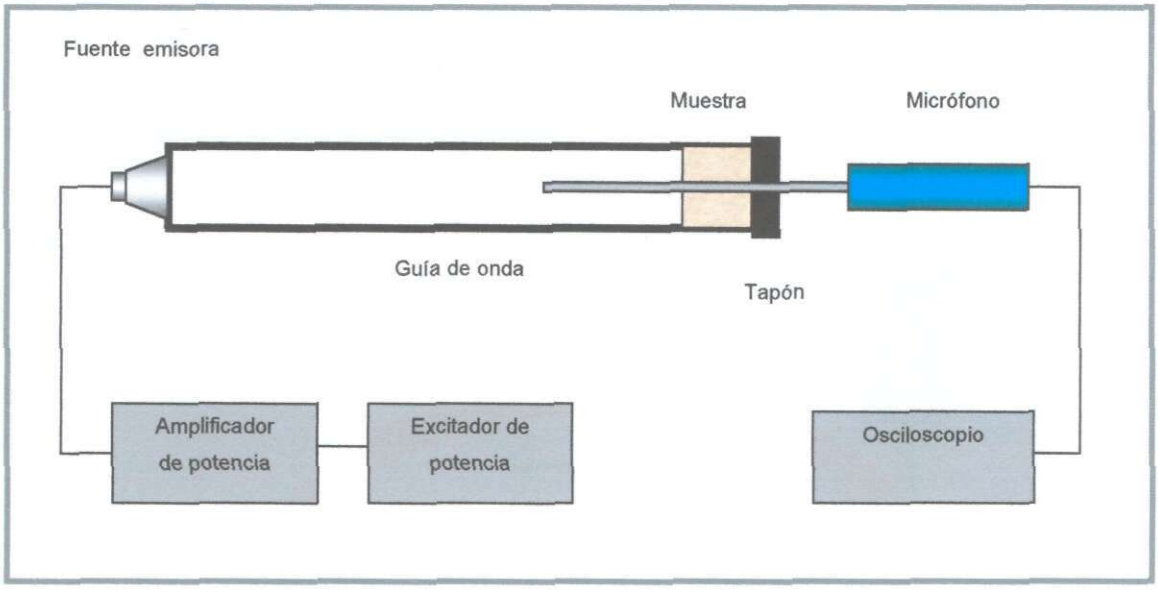


FIGURA 9. Diagrama de bloques del primer sistema.

Durante el desarrollo del primer diseño se procedió a desplazar el micrófono a través de la guía de onda, registrando valores máximos y mínimos de presión acústica, como también la distancia que existe entre la muestra y el primer máximo de presión.

3.4.2 Desarrollo experimental del segundo y tercer diseño. Después de la construcción y prueba del primer diseño, se elaboraron dos sistemas diferentes

de medida basados en diseños realizados por BERANEK (1959). La estructura de estos diseños se representan en la FIGURA 10.

Para la construcción de estos diseños, se debían cumplir los siguientes requerimientos, según lo indicado por GAETE[1]

- La guía de onda debía tener un diámetro tal, que la superficie de la palta (fruto con forma ovalada) fuera lo suficientemente plana para que el extremo de la guía no presentara curvatura alguna. Para cumplir con este requerimiento se debía disminuir al máximo el diámetro de la guía.

- En el diseño anterior, el micrófono ingresaba a la guía por el extremo donde se ubicaba la muestra. En el caso de la palta este sistema no se puede realizar, ya que el producto debía ser perforado.

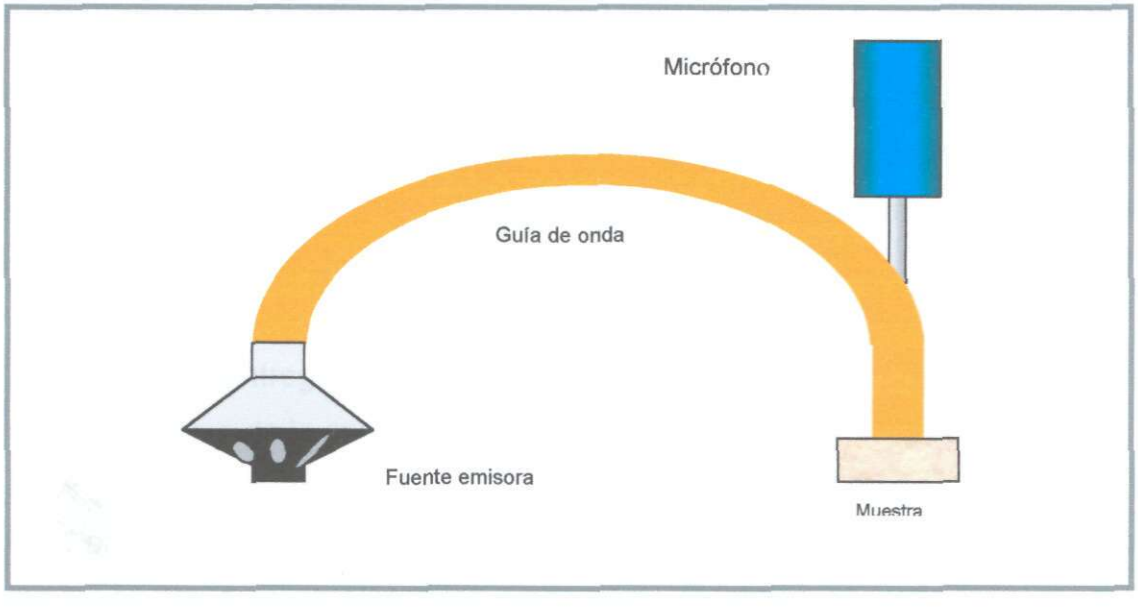


FIGURA 10. Esquema de diseño de equipo línea de transmisión acústica.

[1] GAETE, L..2000. Comunicación personal. Docente, Laboratorio de Ultrasonido, Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile

Para la construcción de la guía de onda se utilizaron dos tipos de materiales, "PVC" y cobre; el diámetro de esta midió alrededor de 14 mm. Además se modificó el sistema de ingreso del micrófono como se muestra en la FIGURA 10.

3.4.3 Desarrollo experimental del cuarto diseño. Según los requerimientos anteriores para la realización del diseño se construyó una cámara cilíndrica de bronce de 8,6 cm de largo, de 0,76 cm de diámetro interno y de 1,5 cm de diámetro externo, en donde en un extremo se ubicó un pistón emisor de ondas ultrasónicas acústicas, y en el otro extremo la muestra. Para darle rigidez al sistema se decidió montar el diseño en un banco óptico de metal.

Debido al alto valor del factor de calidad de la fuente emisora y factores del diseño del equipo se estimó que se debería usar frecuencias de alrededor de 21,5 KHz. Por esta razón se utilizó un pistón emisor de ondas acústicas con esta frecuencia.

El sistema de detección lo constituyó una sonda de un diámetro aproximado de 2 mm y un sistema de desplazamiento mediante un pie de metro que permitió medir distancias con una precisión de la décima de milímetro, como se muestra en la FIGURA 11.

La señal que entregó la sonda fue analizada en un Osciloscopio donde se verificó la forma de la onda y se midió los valores de presión dados en voltaje.

Para probar si el equipo realizaba medidas correctas se midió el coeficiente de absorción de 4 materiales diferentes. Para tal efecto se construyó de cada material una muestra de volumen y forma estándar de 2 cm de diámetro y de 0,5 cm de espesor (FIGURA 7).

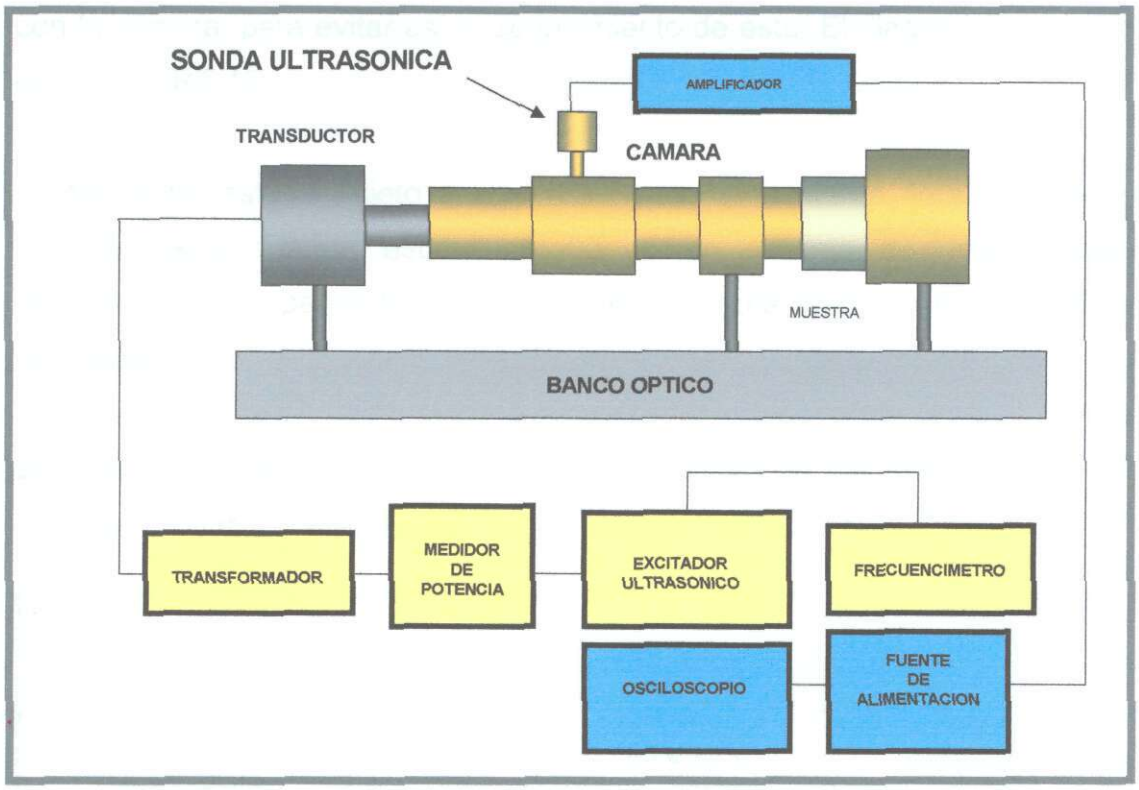


FIGURA 11. Diagrama de bloques del cuarto diseño.

GAETE[1], indicó que el trabajo debía realizarse a una misma frecuencia, ya que el transductor resuena sólo a una frecuencia por tener un factor de calidad alto. Además, se utilizaría una sola potencia, porque al aumentar la potencia se calienta el transductor variando su impedancia, lo cual cambia las características del sistema. Las condiciones de medida fueron de 2,5 W de potencia y 21500 Hz de frecuencia.

3.4.4 Desarrollo experimental del quinto diseño. En este diseño se perfeccionaron limitaciones del diseño anterior, aislándose el sistema de detección de la guía de onda, es decir, el micrófono no ejerció ningún contacto

[1] GAETE, L..2000. Comunicación personal. Docente, Laboratorio de Ultrasonido, Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile.

con la cámara, para evitar así el acoplamiento de este. El diagrama se muestra en la FIGURA 12.

El micrófono estaba sujeto a un brazo, que lo mantenía libre del sistema. También este aparato estaba dotado de un sistema de desplazamiento micrométrico que permitió medir longitudes con una precisión de 1 centésima de milímetro.

En este nuevo diseño se utilizó el mismo conjunto de equipos ocupado en el ensayo anterior. Además la distribución de estos equipos era la misma.

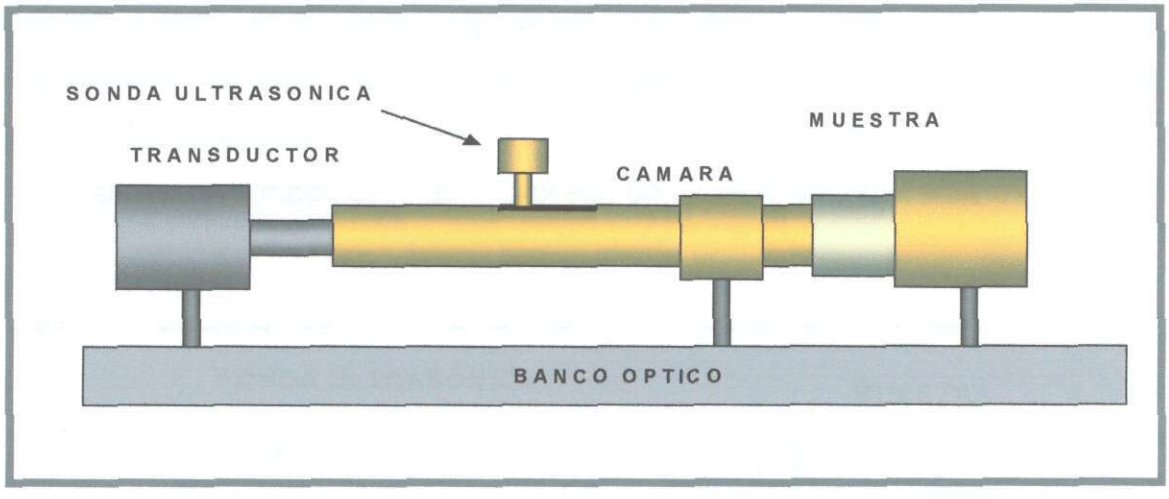


FIGURA 12. Diagrama de instrumento para la medición de absorción acústica superficial con sonda aislada.

Para probar si el equipo realizaba medidas correctas se midió el coeficiente de absorción de 4 materiales diferentes. Las condiciones de medida fueron de 2,5 W de potencia y 21500 Hz de frecuencia.

3.4.5 Desarrollo experimental del sexto diseño. De acuerdo con las limitaciones del diseño anterior, se trasladó la ubicación de la sonda al borde de la muestra, como se muestra en la FIGURA 13. Con este diseño se eliminó el

error cometido por la sonda ubicada a una distancia considerable de la muestra donde el campo acústico va disminuyendo de forma exponencial.

Para probar el buen funcionamiento del sistema, se realizó el mismo ensayo usado en el diseño anterior y con la misma distribución de equipos. Las condiciones de medida fueron de 2,5 W de potencia y 21500 Hz de frecuencia.

3.4.6 Validación experimental del método del coeficiente de absorción acústica en palta

3.4.6.1 Diseño experimental para la validación final. En el estudio de estado de madurez del fruto palta, se eligieron 100 paltas variedad fuerte recién cosechadas, de modo que tuvieran un peso, dimensiones, forma y color lo más uniforme posible. Las muestras fueron elegidas en estado inmaduro con el propósito de que maduraran en el proceso de almacenamiento.

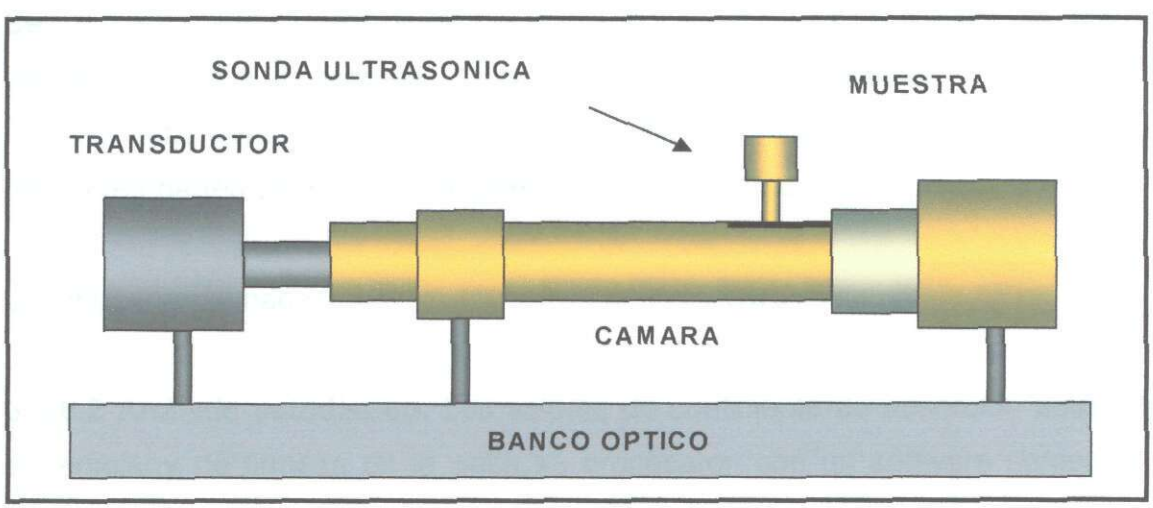


FIGURA 13. Diagrama de instrumento para la medición de absorción acústica superficial con sonda aislada al borde de la muestra.

Las muestras se almacenaron en condiciones normales, es decir, se mantuvieron a una temperatura de 20ºC y una humedad aproximada de 60%. Tales condiciones permitieron que el fruto madurara en un período de 6 días. Las condiciones de medida del sistema fueron de 2,5 W de potencia y 21500 Hz de frecuencia.

Las mediciones se llevaron a cabo en un total de 15 muestras cada 24 horas de almacenamiento, elegidas del lote completamente al azar. Se midieron los siguientes parámetros en cada fruto:

- Coeficiente de absorción acústica superficial (con el sexto diseño de equipo)
- Firmeza(textura)
- Peso
- Diámetro ecuatorial

Se marcó y midió el coeficiente de absorción acústica de cada palta en cuatro diferentes puntos ecuatoriales , según lo descrito por MIZRACH y FLITSANOV (1998). Esta medición se realizó con el fin de detectar la absorción en diferentes partes del fruto, y así obtener un valor promedio.

Las muestras almacenadas se muestran en la FIGURA 14.

3.4.6.2 Análisis estadístico. Los valores de coeficiente de absorción acústica superficial y de firmeza de la palta se procesaron con un software comercial. Una vez procesados los datos a través de un análisis de regresión, se verificó el grado de correlación que existe entre ambos métodos usados, para determinar la factibilidad que el coeficiente de absorción acústica superficial del fruto pueda ser utilizado como un indicador de madurez.

FIGURA 14. Lote de paltas variedad fuerte.

4. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos del coeficiente de absorción acústica de materiales en el diseño de equipos, no es posible compararlos con datos obtenidos por otros autores, ya que las medidas obtenidas de equipos diferentes dependen de factores controlados y regulados por el propio investigador. Si se llegaran a comparar resultados, se esperaría que éstos fueran diferentes.

4.1 Primer diseño

Para la determinación del coeficiente de absorción acústica de cada material se realizaron 3 mediciones por frecuencia emitida. Los promedios y desviaciones estándar se presentan en el CUADRO 4.

Se observa una clara diferencia entre un material absorbente (espuma de poliuretano expandido) con coeficientes de absorción acústica más altos que uno más reflectivo (madera de pino), en las diferentes frecuencias aplicadas. Además, queda en evidencia que los materiales analizados tienen comportamientos distintos en las diferentes frecuencias usadas.

Como se observa en la FIGURA 15, el coeficiente de absorción acústica superficial de la espuma de poliuretano expandido tiene un comportamiento bastante irregular conforme aumenta la frecuencia. Se observa que hay absorciones bastante altas a frecuencias 2000, 4500 y 5000 Hz. En las curvas reportadas por SCHWARTZ y GOHMANN (1962), se confirma la tendencia irregular a diferentes frecuencias por parte de la espuma de poliuretano

expandido. En el caso de la madera de pino se observa que los valores son menores y tienen un comportamiento más regular.

CUADRO 4. Valores de coeficiente de absorción acústica para dos diferentes materiales.

Frecuencia (Hz)	Prom.coef. absorción acústica (Espuma)	DE Coef. absorción acústica (Espuma)	Prom.coef. absorción acústica (Madera)	DE Coef. absorción acústica (Madera)
1000	0,100	0,004	0,092	0,005
1500	0,073	0,002	0,009	0,001
2000	0,311	0,003	0,013	0,002
2500	0,152	0,002	0,065	0,005
3000	0,146	0,002	0,081	0,006
3500	0,070	0,004	0,027	0,003
4000	0,125	0,002	0,018	0,002
4500	0,382	0,004	0,038	0,004
5000	0,324	0,009	0,054	0,004

En la frecuencia de 1000 Hz los materiales presentan absorciones parecidas. Esto se debe al hecho que a frecuencias bajas el instrumento utilizado para las mediciones no tiene buena sensibilidad.

Con todo lo expuesto anteriormente tanto el modelo matemático como el equipo usado permiten obtener valores de coeficiente de absorción acústica superficial de materiales reflectivos (madera) como absorbentes (espuma de poliuretano expandido).

Pese a que en este primer diseño se obtienen valores de coefieficiente de absorción acústica no es adecuado modelar una curva de absorción acústica para cada material, porque su tendencia no tiene una explicación física. Debe asumirse que al aumentar la frecuencia resonante, los materiales se comportan de manera no clara (SCHWARTZ y GOHMANN, 1962).

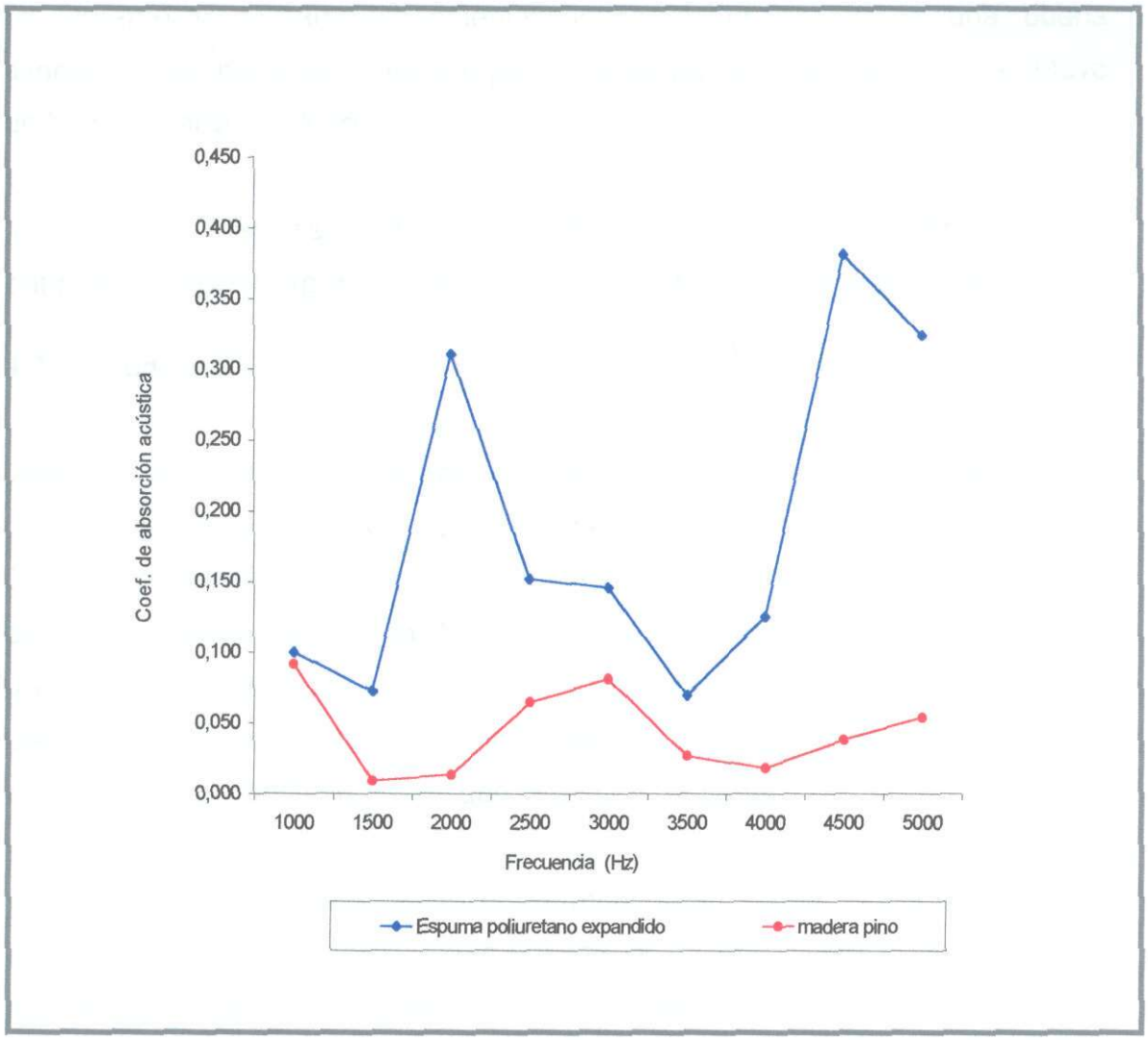


FIGURA 15. Coeficiente de absorción acústica de dos materiales en función de distintas frecuencias.

4.2 Segundo y tercer diseño

Después de construir y probar los dos equipos, estos presentaron los siguientes problemas:

- El diámetro del micrófono era demasiado grande para el diámetro de la guía, lo cual estaba interfiriendo en el campo acústico del sistema. En otras palabras, el micrófono estaba actuando como material reflectivo.

- Durante el trabajo experimental nunca se pudo obtener una buena alineación del mecanismo, ya que por no tener un sistema rígido, no se obtuvo un buen soporte mecánico.

Los modelos (diseños) están en los ANEXOS 4 y 5.Con estos diseños no se obtuvieron valores experimentales por lo señalado en los párrafos anteriores.

4.3 Cuarto diseño

Después de construir este diseño, se presentaron problemas en las mediciones del coeficiente de absorción acústica superficial de los materiales en estudio. Este inconveniente se produjo porque el sistema de detección (micrófono) estaba acoplando en la guía de onda, es decir, estaba absorbiendo energía a través de las paredes de la cámara. Al recibir energía que no sea directamente del campo acústico formado al interior de la cámara, se produce error en las mediciones de presión acústica que detecta el sistema.

Por las limitaciones antes señaladas se muestra sólo una medida de absorción acústica para cada material. Estos valores se detallan a modo de ejemplificar los ensayos defectuosos presentados por este diseño. En el CUADRO 5 se presentan diferentes materiales con su respectivo valor de absorción, valores estos que no guardan relación con lo esperado.

Al observar los resultados obtenidos en la FIGURA 16 no es posible discriminar entre materiales absorbentes y reflectivos, debido a que materiales absorbentes (espuma poliuretano) obtuvieron valores menores de absorción que algunos materiales reflectivos (madera), lo que no era lógico de esperar. Además la espuma moltopren que debería ser menos absorbente que la espuma poliuretano, presenta una absorción acústica mayor.

CUADRO 5. Absorción acústica de diferentes materiales a 2,5 W de potencia y 21.500 Hz de frecuencia, para el cuarto diseño.

Materiales	Coeficiente de absorción acústica
Espuma(moltopren)	0,376
Espuma(poliuretano)	0,243
Madera(pino)	0,301
Metal(bronce)	0,218

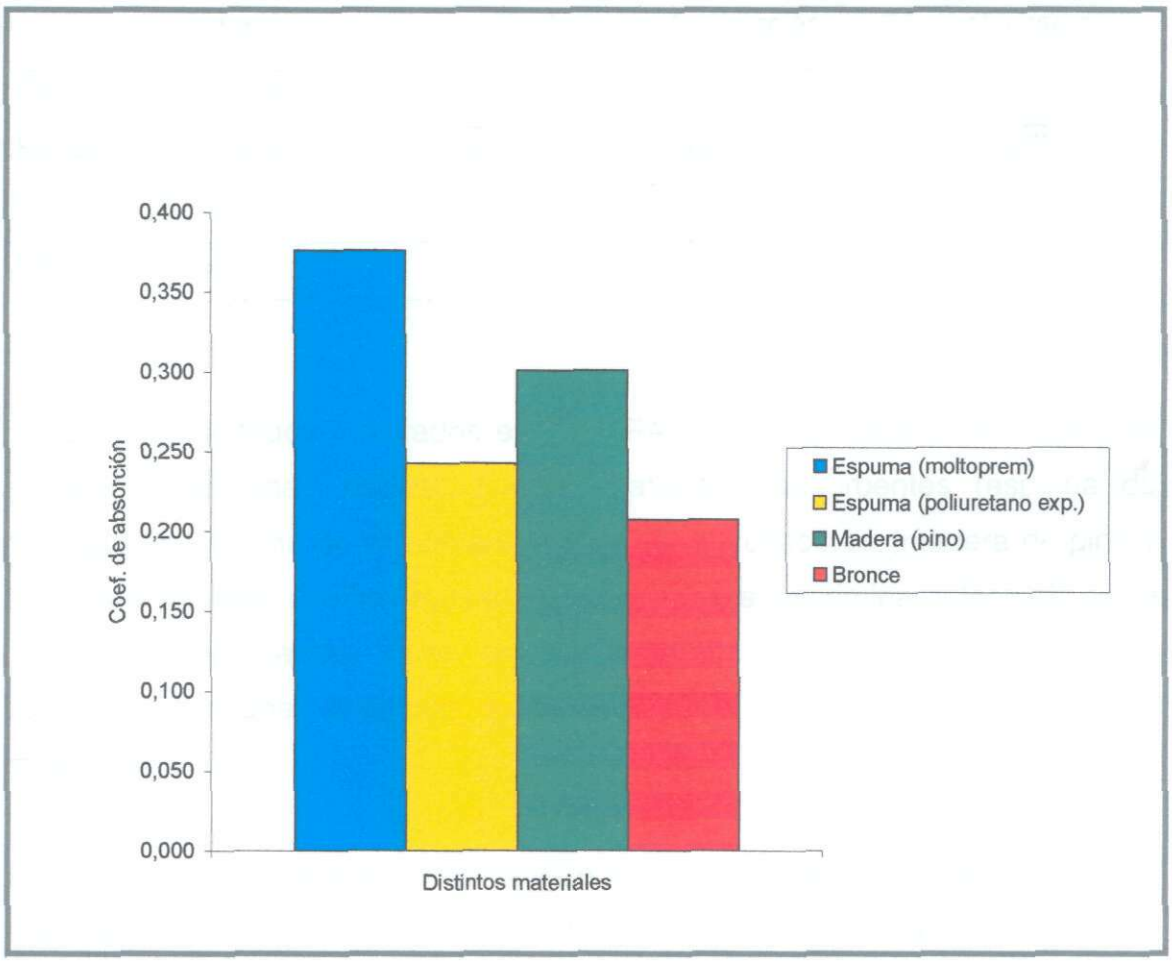


FIGURA 16. Coeficiente de absorción acústica para diferentes materiales, para el cuarto diseño.

4.4 Quinto diseño

En este diseño se hicieron las modificaciones indicadas en el punto 3.4.4. Para la determinación del coeficiente de absorción acústica de cada material se realizaron 3 mediciones por cada material, los promedios y desviaciones estándar se presentan en el CUADRO 6.

CUADRO 6. Absorción acústica de diferentes materiales a 2,5 W de potencia y 21.500 Hz de frecuencia, para el quinto diseño.

Materiales	Prom. coef. absorción acústica	DE coef. absorción acústica
Espuma (moltopren)	0,1103	0.0079
Espuma (poliuretano expandido)	0,1383	0.0052
Madera (pino)	0,0147	0.0084
Metal (bronce)	0,0148	0.0073

Según los resultados mostrados en FIGURA 17 de este diseño, los datos de absorción dan una diferencia entre materiales absorbentes (espuma de moltopren y espuma de poliuretano expandido) y reflectivos (madera de pino y bronce). Pero este diseño (equipo) no fue capaz de discriminar diferencia entre materiales absorbentes, como en el caso de espuma de poliuretano[1] que debería tener una absorción sustancialmente mayor que la espuma de moltopren.

En el caso de la madera con el bronce las absorciones obtenidas para estos materiales no difieren mayormente, debiéndose obtener resultados menores de absorción para el bronce, por ser un material más reflectivo que la madera.

[1] Material con una absorción acústica muy alta que se utiliza en la construcción de cámaras anecoicas (recinto libre de reflexiones), las cuales se utilizan en la calibración de micrófonos.

Esta situación limita el uso de este diseño para medir el coeficiente de absorción acústica de materiales.

Las limitaciones para este diseño es que la sonda (sistema de detección) se encuentra ubicada en el medio de la cámara. De acuerdo al modelo teórico usado, a medida que la sonda se ubica a mayor distancia de la muestra el campo acústico va disminuyendo de forma exponencial. Por esta razón no se encontraron diferencias sustanciales entre materiales parecidos.

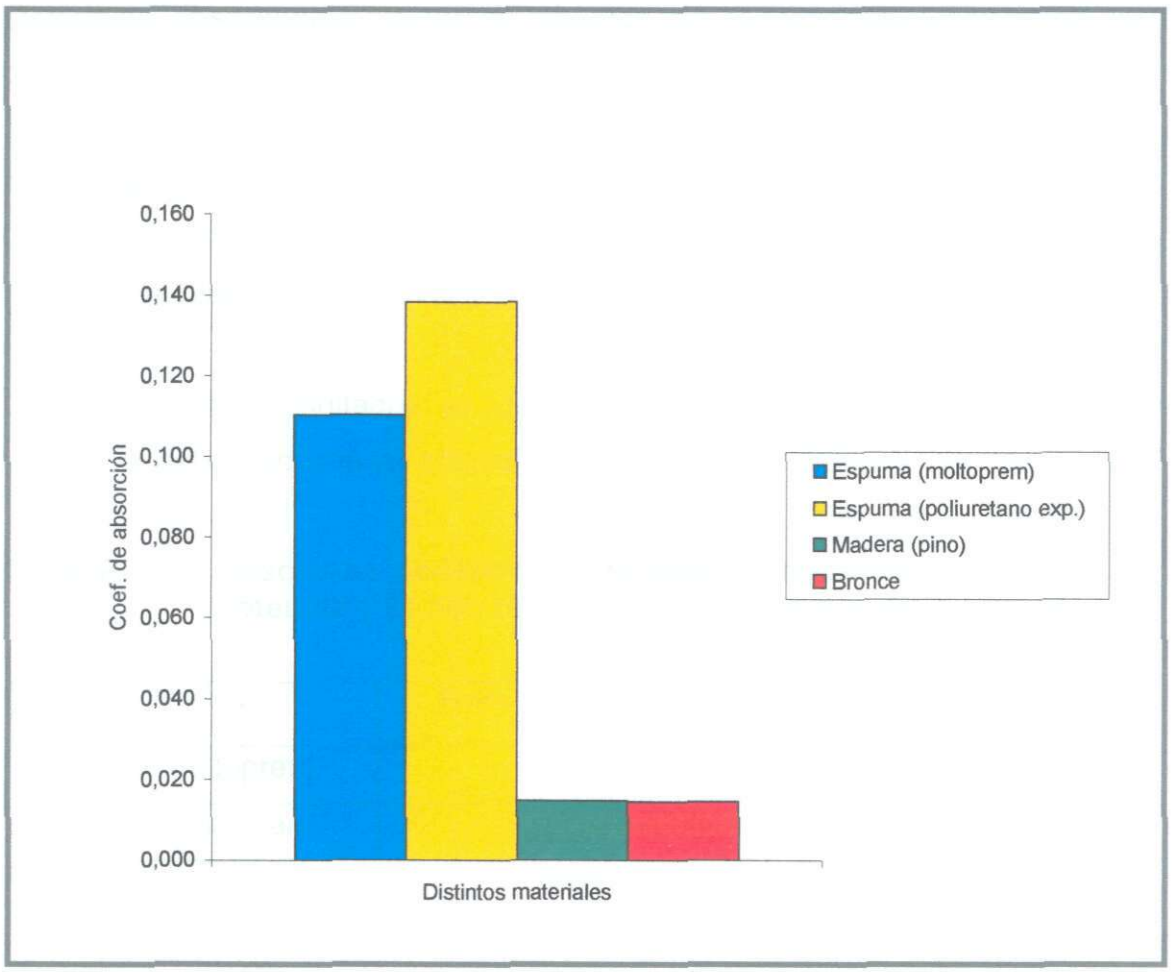


FIGURA 17. Coeficiente de absorción acústica para diferentes materiales, para el quinto diseño.

4.5 Sexto diseño

Finalmente se llegó a un sexto diseño. Para la determinación del coeficiente de absorción acústica de cada material se realizaron 3 mediciones de cada uno. En el CUADRO 7 se presentan valores de absorción obtenidos.

En la FIGURA 18 de este diseño, se observa con mayor claridad la diferencia del coeficiente de absorción acústica entre materiales absorbentes y reflectivos. Con este diseño (equipo) se pudo obtener las diferencias esperadas entre materiales absorbentes; como en el caso de espuma de poliuretano que presenta una absorción sustancialmente mayor que la espuma de moltopren. En el caso de la madera con el bronce las absorciones obtenidas para estos materiales presentan diferencias, con resultados menores de absorción para el bronce, lo que coincide con valores que entrega la literatura (GAETE y OYARZUN,1985).

Obtenidos estos resultados se decide utilizar este diseño en la medición preliminar del coeficiente de absorción acústica de la palta.

CUADRO 7. Absorción acústica de diferentes materiales a 2,5 W de potencia y 21.500 Hz de frecuencia, para el sexto diseño.

Materiales	Prom. coef. absorción acústica	DE coef. absorción acústica
Espuma (moltopren)	0.076	0.0081
Espuma (poliuretano)	0.386	0.0040
Madera (pino)	0.031	0.0079
Metal (bronce)	0.019	0.0094

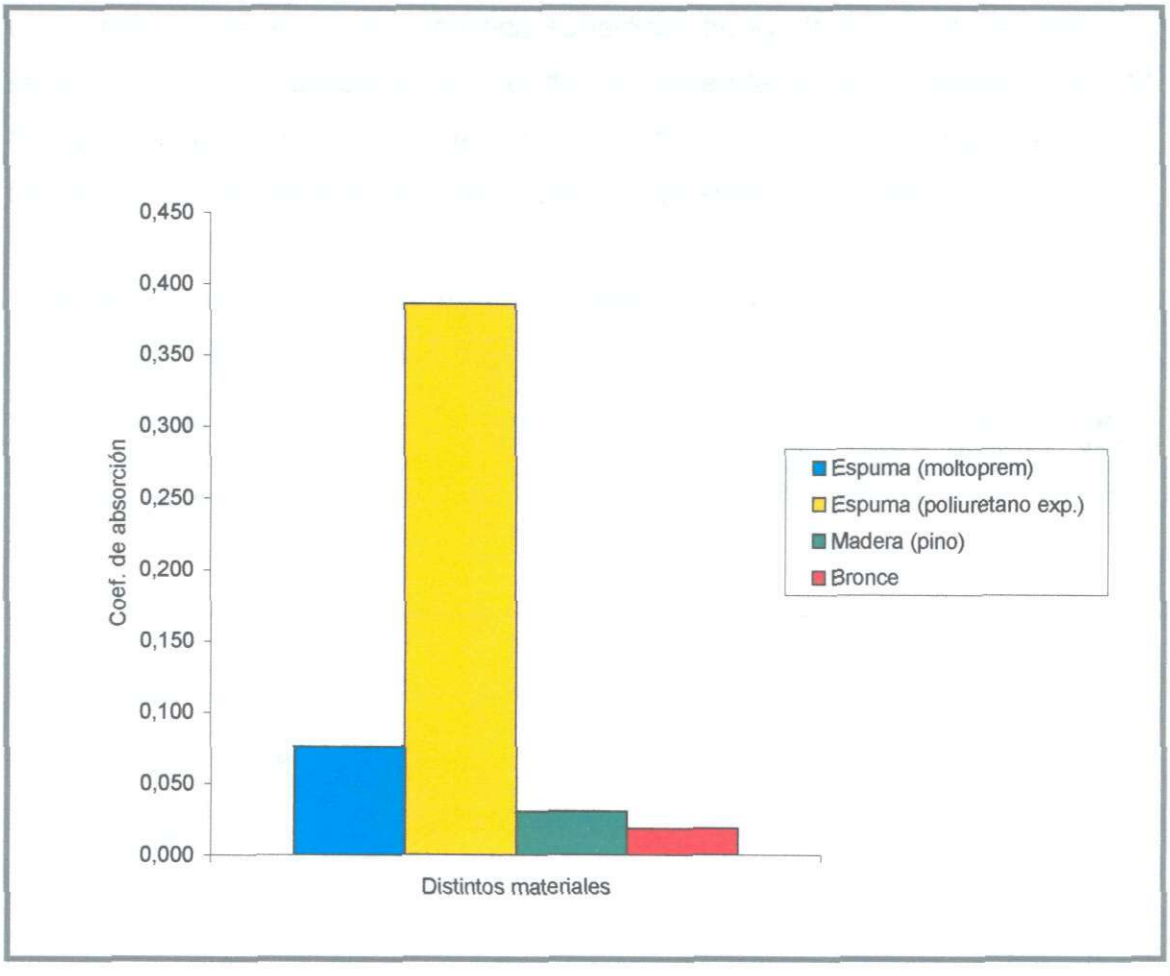


FIGURA 18. Coeficiente de absorción acústica para diferentes materiales, para el sexto diseño.

4.6 Experiencia final

Utilizando el último de los diseños confeccionados(sexto diseño), se procedió a realizar las mediciones en el fruto palta.

Los resultados obtenidos son presentados en el CUADRO 8. En este se muestra el promedio y desviación estándar para el coeficiente de absorción, firmeza, masa y diámetro ecuatorial.

El coeficiente de absorción acústica superficial de los frutos, como se observa en la FIGURA 19, presenta una tendencia ascendente en un periodo de 144 horas de almacenamiento, por el contrario la firmeza de las muestras tiene una tendencia descendente en el mismo período de almacenamiento.

CUADRO 8. Valores promedio de los diferentes parámetros de los frutos.

Horas	Coeficiente de absorción	DE(Coef. abs.)	Firmeza(kg/cm2)	DE(Firmeza)	Peso(gr)	DE(Peso)	Diametro(mm)	DE(Diametro)
24	0,025	0,010	26,000	0,050	150,247	12,935	54,733	2,549
48	0,029	0,007	23,367	5,446	148,070	15,370	53,933	2,738
72	0,032	0,008	18,680	8,432	143,825	12,671	54,267	2,404
96	0,042	0,008	9,180	6,909	142,479	17,396	54,000	3,295
120	0,053	0,010	2,300	0,653	143,519	15,886	53,733	3,845
144	0,061	0,006	0,000	0,050	140,905	16,416	53,133	2,924

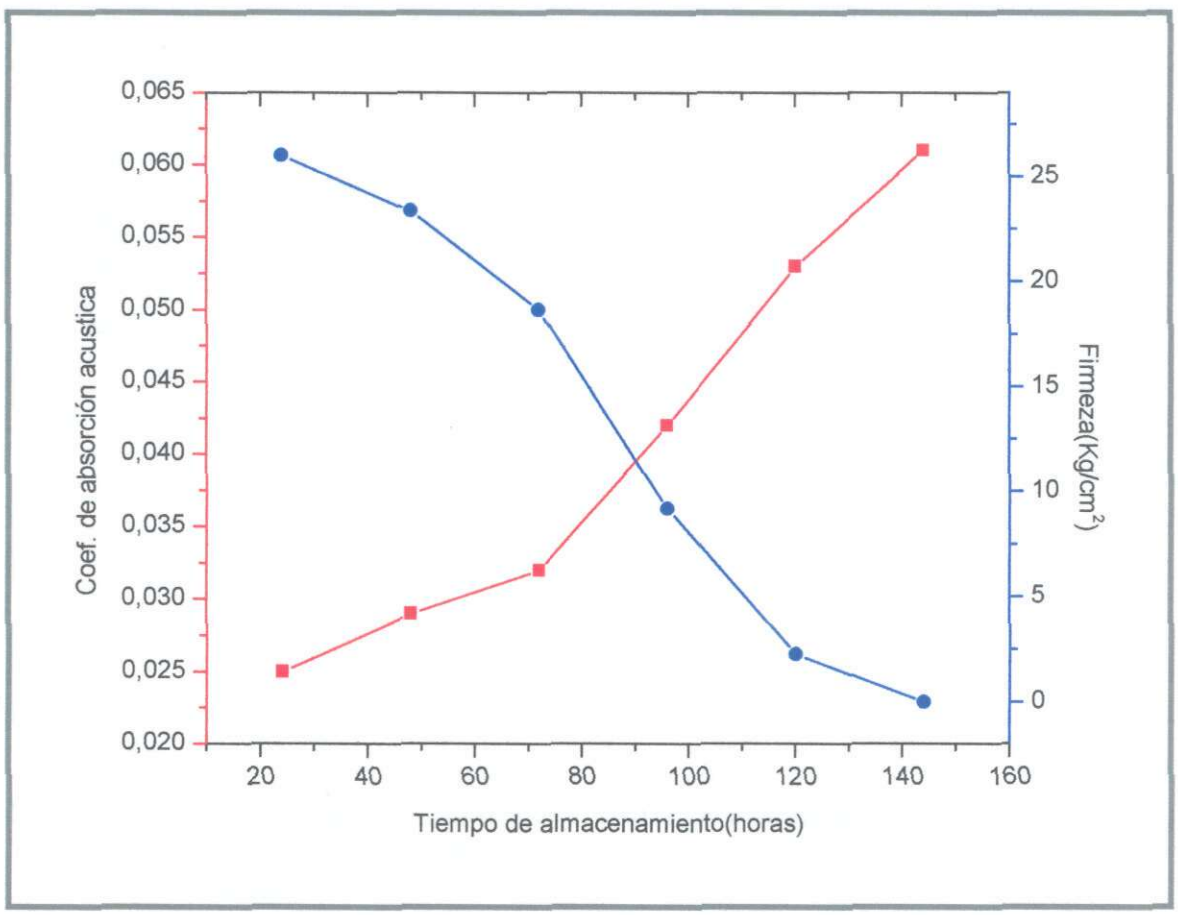


FIGURA 19. Coeficiente de absorción acústica y firmeza del fruto palta variedad fuerte en función del tiempo de almacenamiento.

Se puede observar que el método patrón(firmeza del fruto) después del sexto día, tiende a entregar valores cercanos a cero, incluso la escala de medida del equipo se encuentra fuera de rango. De otro modo el método no invasivo (coeficiente de absorción acústica superficial del fruto) después de 144 horas de almacenamiento puede determinar datos de absorción.

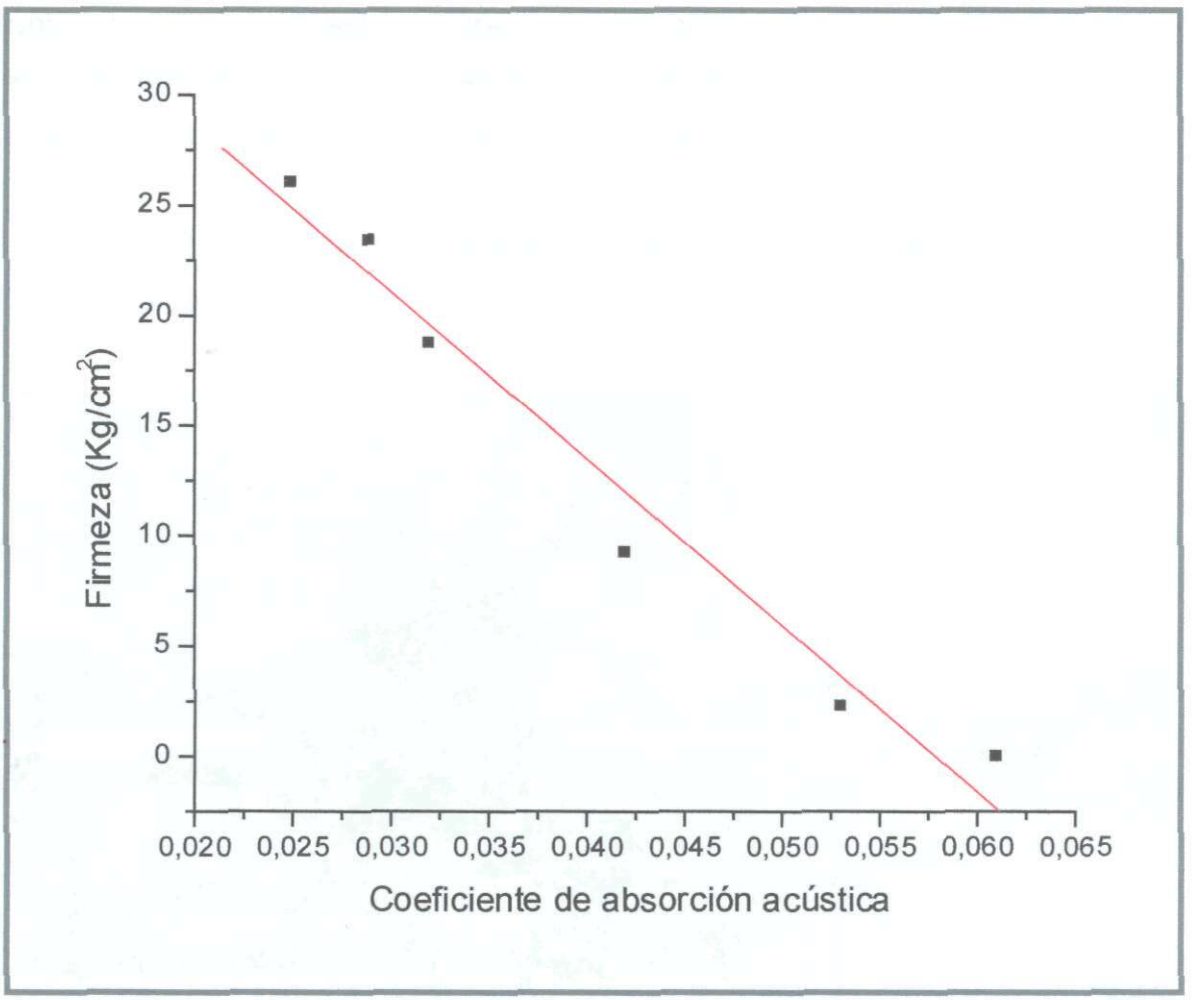


FIGURA 20. Estimación lineal para firmeza del fruto en función de su coeficiente de absorción para 144 horas de almacenamiento a 20ºC.

En la FIGURA 20 se presenta un análisis de regresión lineal para los dos métodos en cuestión, coeficiente de absorción acústica superficial (método no

destructivo) y firmeza del fruto (método patrón). El modelo estimado para el ensayo fue el siguiente:

*(Firmeza) = 43,79 – 757,06 * (Coeficiente de absorción acústica)*

El coeficiente de correlación alcanzó un valor de -0,983. De acuerdo con lo anterior el modelo muestra un grado de asociación entre las variables firmeza y el coeficiente de absorción acústica superficial. Además, al realizar el ajuste, se puede decir que el modelo con un 95% de confianza es significativo.

En la FIGURA 21 se presenta la medición del coeficiente de absorción acústica superficial de la palta.

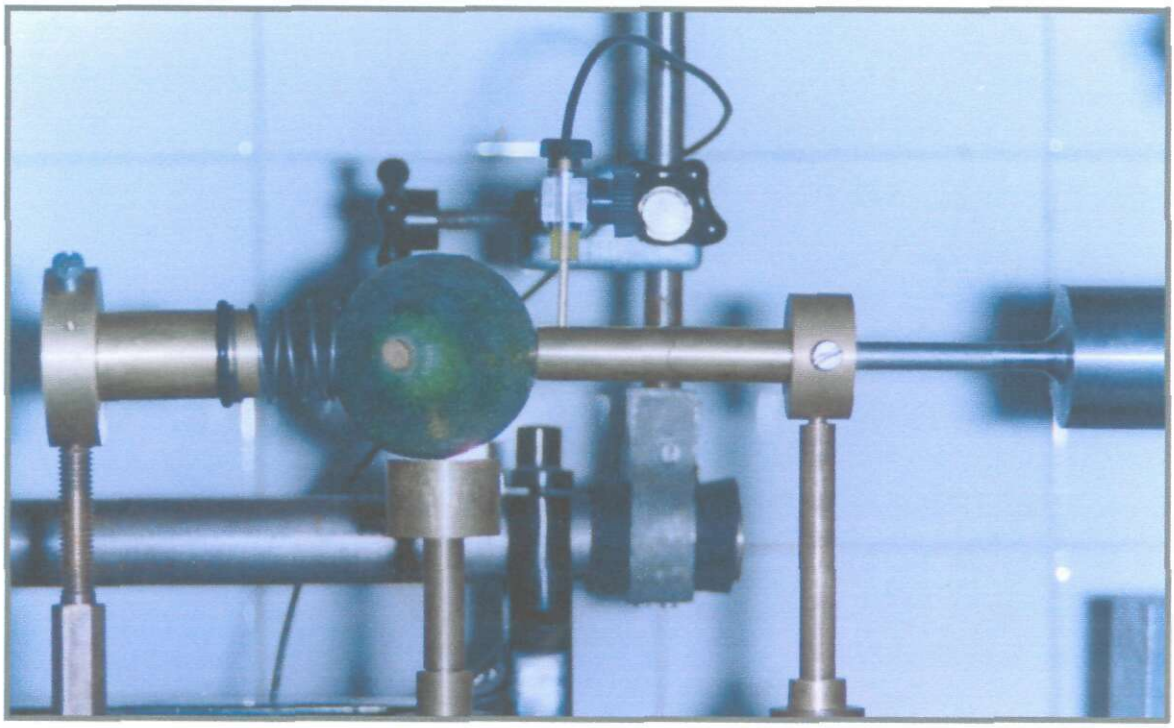


FIGURA 21. Medición de la absorción acústica del fruto palta variedad fuerte.

Pese a que con el último diseño, se pudieron obtener valores esperados de coeficiente de absorción acústica superficial, en este caso de la palta, hay que señalar que el sistema (diseño) presenta las siguientes limitaciones:

- El proceso de determinación del coeficiente de absorción acústica superficial de la palta es demasiado lento (toma alrededor de 20 minutos por muestra).

- Deberá contrastarse con otros indicadores de estado de madurez de la palta, como la determinación del contenido de aceite y el porcentaje de materia seca, por ejemplo.

5. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un equipo que permite establecer el coeficiente de absorción acústica superficial del fruto como índice de madurez, sin ocasionarle daño alguno.

- Se estableció que a medida que ocurría la maduración en el fruto, su coeficiente de absorción acústica superficial cambia en forma ascendente, es decir, aumenta mientras el tiempo de almacenamiento transcurre.

- Los resultados obtenidos, determinan un alto grado de correlación entre el método no invasivo (coeficiente de absorción acústica superficial del fruto) y método patrón (firmeza del fruto). Sin embargo para validar este método es necesario disponer de una mayor cantidad de ensayos.

- Por lo laborioso del proceso de determinación del coeficiente de absorción acústica superficial del fruto, y la velocidad que requiere un sistema de evaluación del estado de madurez en línea, es menester diseñar un sistema más rápido para la determinación del coeficiente de absorción acústica superficial de la palta. Este desarrollo posibilitaría su aplicación industrial.

6. RESUMEN

Se estudió un sistema para la medición del estado de madurez en palta (*Persea americana Mill.*) . Se partió de la hipótesis fundamental de que el grado de madurez de la palta está directamente relacionado con la coeficiente de absorción acústica de ésta. El equipo llamado línea de transmisión acústica, consiste en enviar un onda acústica constante a través de un tubo (logrando obtener el primer modo longitudinal) en frente de la palta, produciéndose una onda estacionaria, para así determinar máximos y mínimos de presión. Con estas medidas se obtuvo mediante un modelo teórico la determinación del coeficiente de absorción acústica.

Para estos efectos se diseñó y construyó un equipo basado en la teoría de línea de transmisión acústica a una frecuencia de 21,5 KHz. En la última etapa del estudio, y para probar el diseño, se midió la absorción de 15 frutos de palta cada 24 horas, a los cuales además se les determinó firmeza con un penetrómetro manual (método patrón). El total de frutos maduraron en un período de 6 días a una temperatura de 20ºC a una humedad aproximadamente de 60%. El resultado estableció que a medida que ocurría la maduración en el fruto, su coeficiente de absorción acústica superficial aumentó y la firmeza del fruto disminuyó.

Realizando una regresión lineal adecuada a las curvas de absorción y firmeza del fruto, el resultado de este análisis mostró una adecuada correlación (R = -0,983) entre el método no invasivo (coeficiente de absorción acústica superficial) y el método patrón (firmeza).

SUMMARY

A system for the mensuration state of maturity in avocado (Persea americana Mill.) begun whith the fundamental hypothesis that the degree of maturity of the avocado is directly related with the coefficient of acoustic absorption of it. The equipment called line of acoustic transmission, consists in the transmission a constant acoustic wave through a tube (alowing to obtain the first longitudinal way) in front of the avocado, taking place a stationary wave, to determine maximun and minimun of pressure. Finally a theoretical model was obtained for the determination of the acustic absortion coeficient.

The equipment was designed and built at a base frecuency of 21,5 KHz. The final stage of these study consisted in measuring the acustic absortion of 15 avocados every day also a measure of firmness was made with a manual penetrometer (patron method). The total of fruits matured in a period of 6 days at 20ºCof temperature and a humidity aprox. of 60%. The result settled down that as it happened the maturation in the fruit, its coefficient of superficial acoustic absorption increased and the stability of the fruit decrease.

Finally a lineal regression curve is adyusted to the absorption and firmness of the fruit, the result of this analysis showed an appropriate correlation (R= -0,983) among the non destructive(coefficient of superficial acoustic absorption) and the patron method (firmness).

7. BIBLIOGRAFIA

ABBOTT, J., BACHMAN, G., CHILDERS, J., FITZGERALD, y MATUSKI, N. 1968. Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetebles. Food technology. 22 (5):101-112 p.

BERANEK, L. 1959. Acustic measurements. John Wiley and Sons, New York London. 915 p.

BERG, B. 1989. Determining maturity in whole avocados. California Avocados Soc. Yearbook. 73 : 173 – 186.

BLUMENFELD, A. y GAZIT, S. 1974. Development of seeded and seedless avocado fruits. Journal American Society for Horticutural Science. 99: 442- 448.

CHANDLER, W .1958. Evergreen Orchards. 2ª edición. Lea and Febiger, Philadelphia. 535 p.

CHEN, P. , McCARTHY, M. , KAUTEN, R. , SARIG, Y. y HAN, S. 1993. Maturity evaluation of avocados by NMR methods. Journal Agricultural Engineering Reserch. 55(3) : 177- 187.

CHILE, CORPORACION DE FOMENTO DE LA PRODUCCION, 1984. Catalogo frutícola. Chile. 50p.

ESTEBAN, P. 1993. Estimación del contenido de aceite a través de la humedad y su relación con la palatabilidad en frutos de paltos de las variedades: Negra de la Cruz, Bacon, Edranol y Hass desde la última etapa del desarrollo hasta la madurez fisiológica. Tesis Ing. Agr. Quillota, Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía. 54 p

GAETE, L. y OYARZUN, R. 1985. Determinación del coeficiente absorción acústica de materiales a frecuencias ultrasónicas. Revista de Acústica, 16:91-95

GAILLARD, J. 1987. L' avocatier, sa culture, sa culture, ses produits. Maisonneeuve and Larose. París. 419 p.

GARDIZABAL, F. y ROSENBERG, G. 1991, El cultivo del palto. Quillota, Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía. 201 p.

HUMAN, T. 1987. Oil as a by product of the avocado. South African Avocado Growers Assoc. Yrb. 10 : 159-162 p.

IBAR, L. 1986. Cultivo del aguacate, chirimoyo, mango, papayo. Tercera edición Barcelona. Editorial Aedos. 175 p.

JACKSON, D. 1986. Temperate and subtropical fruits production. Wllington. Nueva Zelandia: Butherworths. Horticultural books. 294p.

KINSLER, E.1962. Fundamentals of acustics. John Wiley and Sons, New York London. 524 p.

LEWIS, C. 1978. The maturity of avocado. Journal of the Science of Food and Agricuture. 29: 857- 866.

LUZA, A. 1981. Caracterización y comportamiento en postcosecha de palta raza americana cultivadas en Chile. Tesis Ms Cs. Santiago, Universidad de Chile. 102 p.

MIZRACH, A. y FLITSANOV, U. 1998. Nondestructive ultrasonic measurement method for evaluation avocado ripening. Acta Horticulturae, 421:111-119.

MIZRACH, A. y GALILI, N. 1996. Models of ultrasonic parameters to assess avocado properties and shelf life. Journal Agricultural Engineering Reserch. 65:261-267.

OLAETA, J. , GARDIAZABAL, F. y MARTINEZ, O. 1986. Variación estacional en el contenido de aceite y su relación con la palatabilidad, en frutos de palto (*Persea americana mill*). Agricultura Técnica. 46(3): 365 - 367.

PANTASTICO, B.1979. Fisiología de la post recolección, manejo y utilización de frutas y hortalizas tropicales y subtropicales.México, D.F. Cecsa. 663 p.

PETTORINO, A.1998. Desarrollo y aplicación de un sistema para caracterización de materiales por ultrasonidos. Tesis Mg. Física. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias. 49 p.

POPENOE, W. 1976. Manual of tropical and subtropical. Hafner press. New York (Facsimil de la edicion de 1920). 474 p

POPENOE, W. 1963. Early history of avocado. California Avocado Society Yearbook.47: 19-24.

SEARS, F.1965. Mecánica, movimiento ondulatorio y calor. Editorial Aguilar. Madrid, España. 427- 470.

SELF, G., ORDOZGOITI, E. POVEY, M. y WAINWRIGHT, H. 1984. Ultrasonic evaluation of ripening avocado flesh. Postharvest Biology and Technology 4 (2): 12 – 13.

SCHWARTZ, M. y GOHMANN, J. 1962. Influence of surface coatings on impedance and absorption of urethane foams. Journal of the Acoustical Society of America. 44 (4) : 502-513p.

TAPIA , A.1995. Inspección de soldaduras por ultrasonido. Tesis Ingienería civil mecánica .Santiago. Universisdad Católica de Chile. Facultad de Ingienería. 87 p.

WILLIAMS, L.1976. The botany of avocado and its relatives. Proc. First Intenational Tropical Fruits Short Curse. University of Florida. Gainesville: 9-15.

YOUNG, R. y LEE S. 1978.Avocado fruit maturity. Avocado Society Yearbook 62: 51 – 57.

ZAUBERMAN, G., FUCHS, Y. y ACKERMAN, M.1986. Prolong the harvest dates of two avocado cultivars and its effects on physiological parameters of the fruits. Alon Hanotea 40 (12): 1137 – 1145.

ZAUBERMAN, G. y FUCHS, Y. 1981.Effects of wounding on " fuerte" avocado ripening. HortScience. 16: 496- 497.

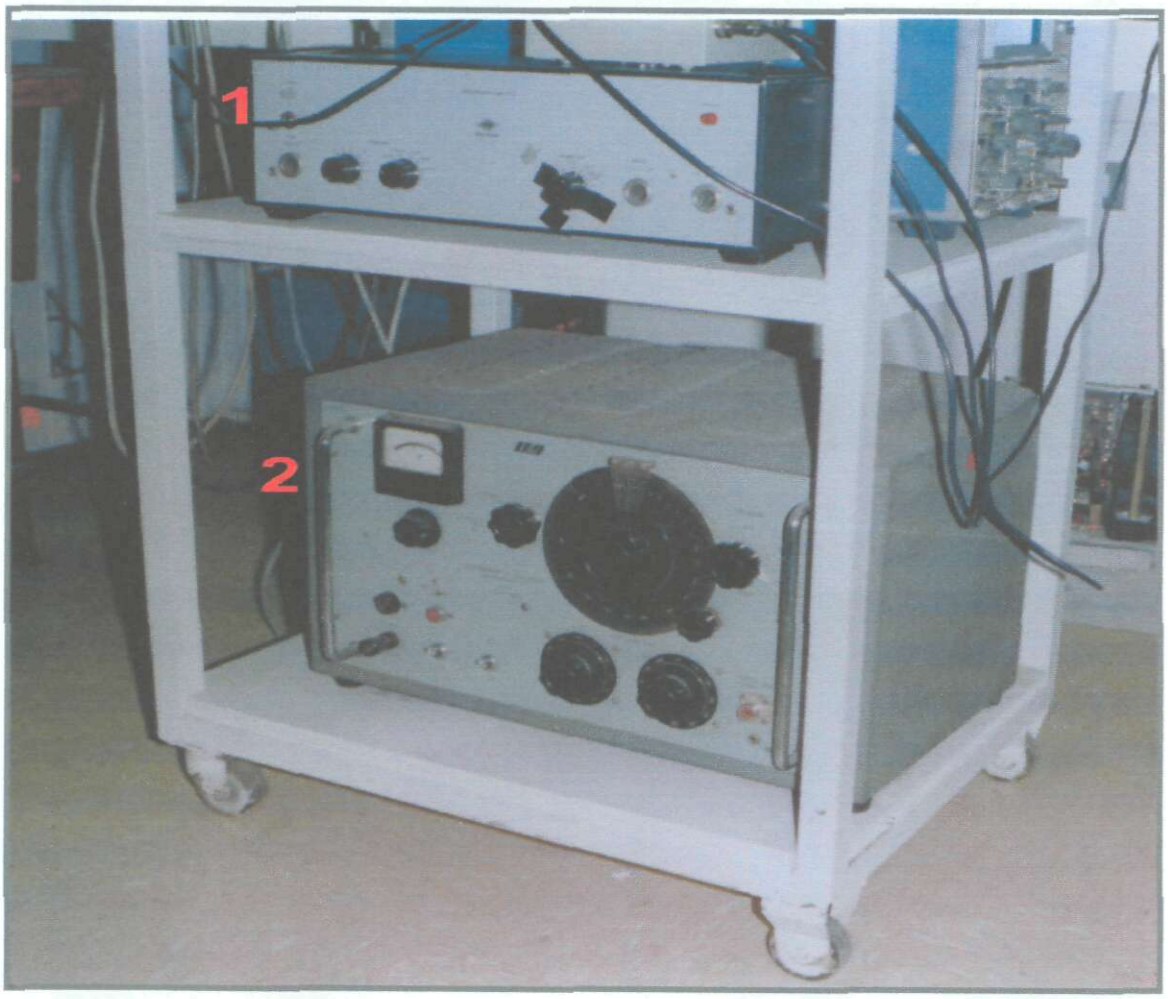
ZAUBERMAN, G. y FUCHS, Y. 1973. Ripening processes in avocado stored in ethylene atmosphere in cold storage. American Society for Horticultural Science. 98: 477- 480.

ANEXOS

ANEXO 1

1. Equipos utilizados en el primer, segundo y tercer diseño.

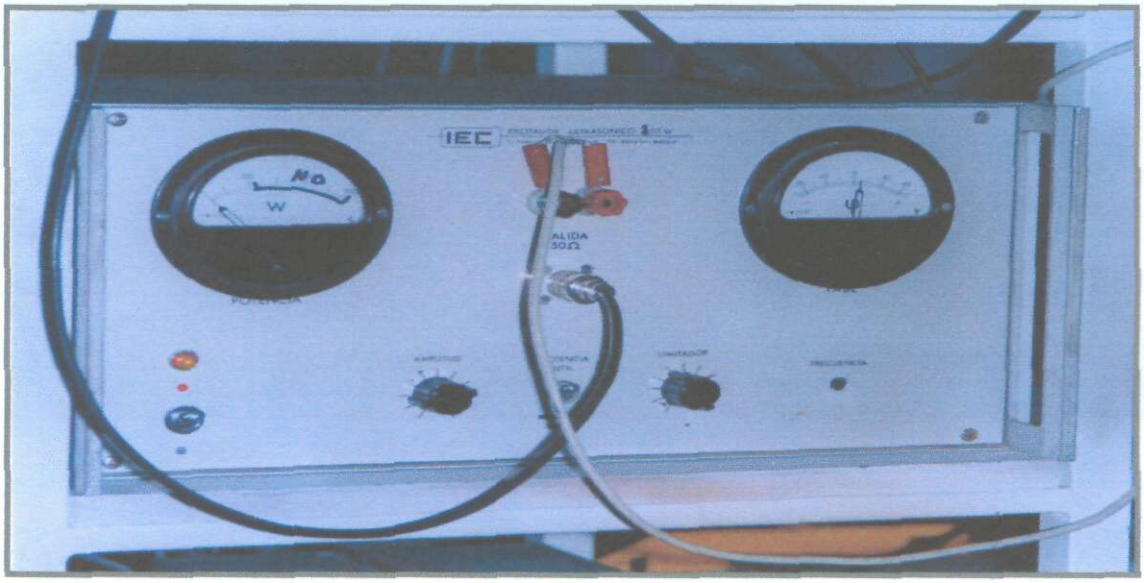
1.1 Amplificador de poder (1) y excitador de potencia (2) .



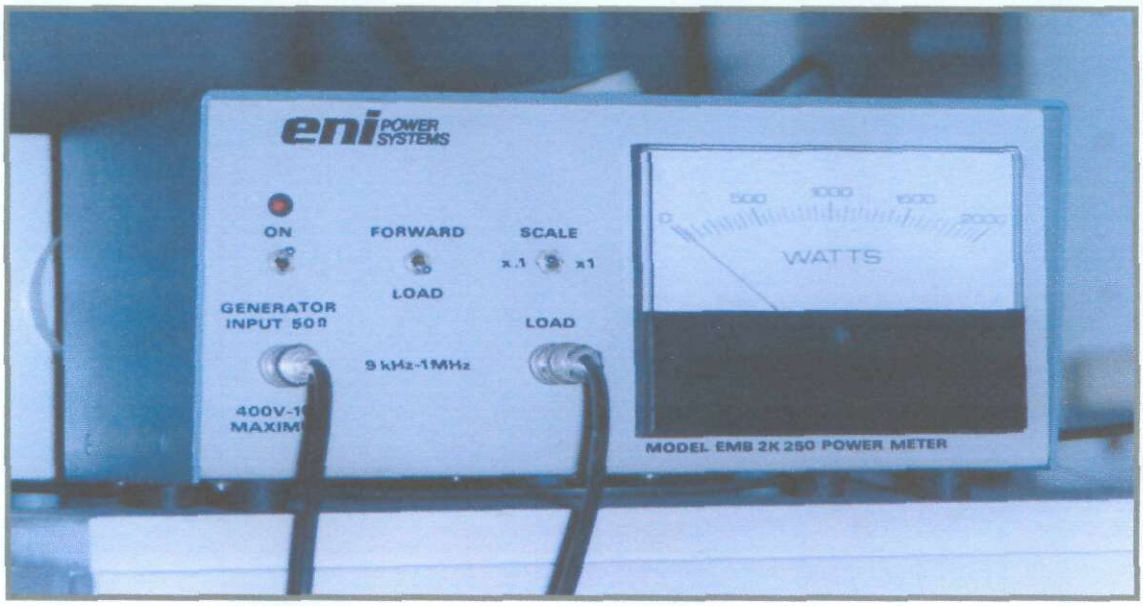
ANEXO 2

2. Equipos utilizados en el cuarto, quinto y sexto diseño y en ensayo final.

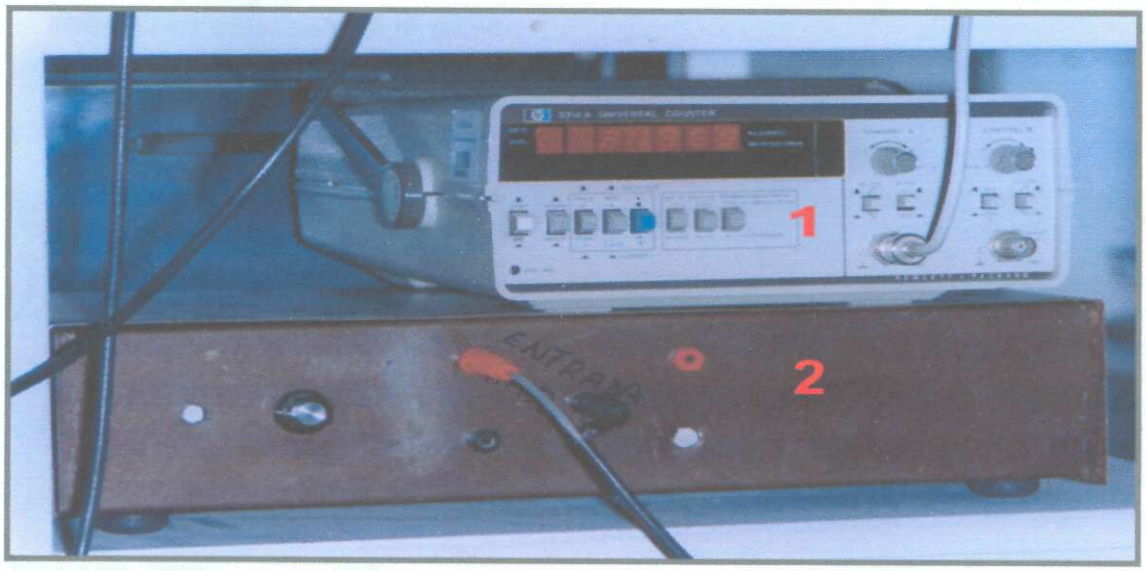
2.1 Excitador ultrasónico.



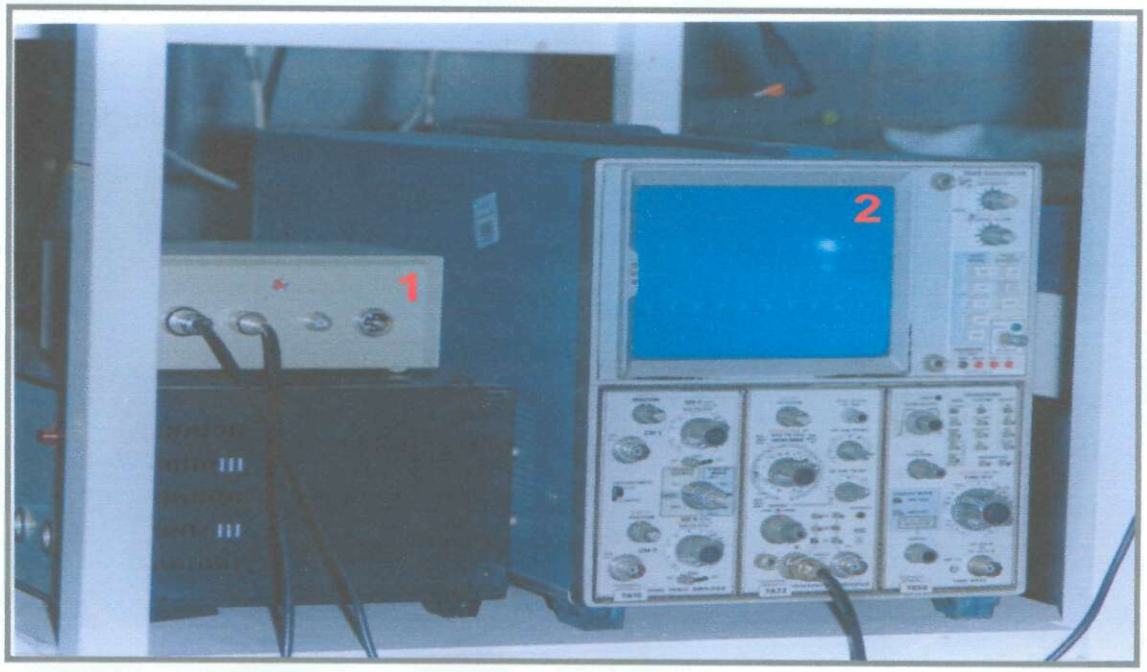
2.2 Medidor de potencia.



2.3 Frecuencímetro (1) y transformador de impedancia (2).



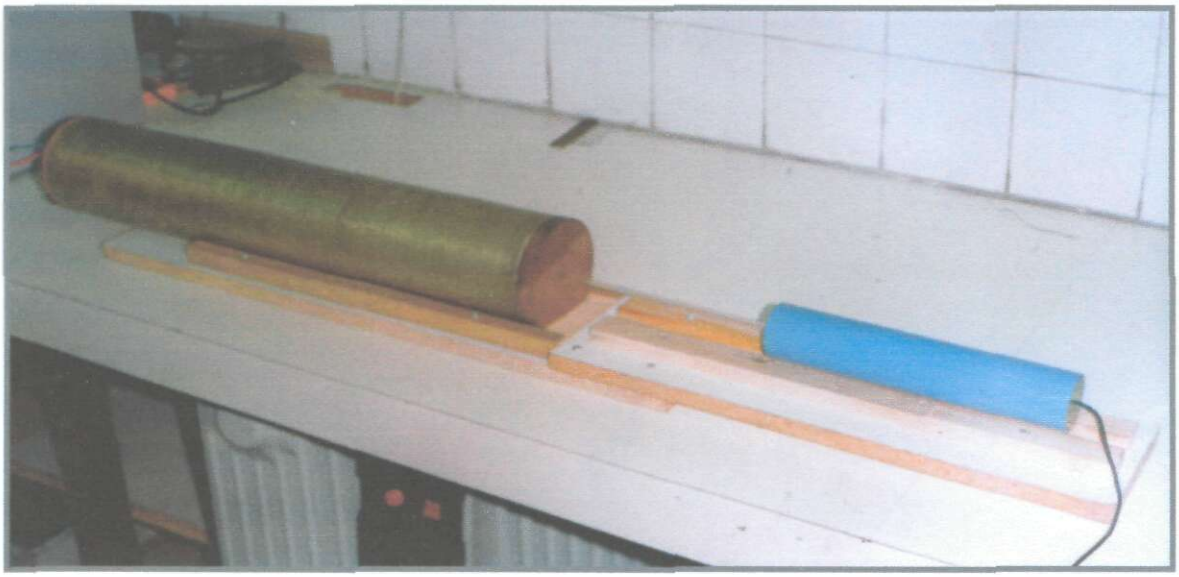
2.4 Amplificador(1) y osciloscopio(2).



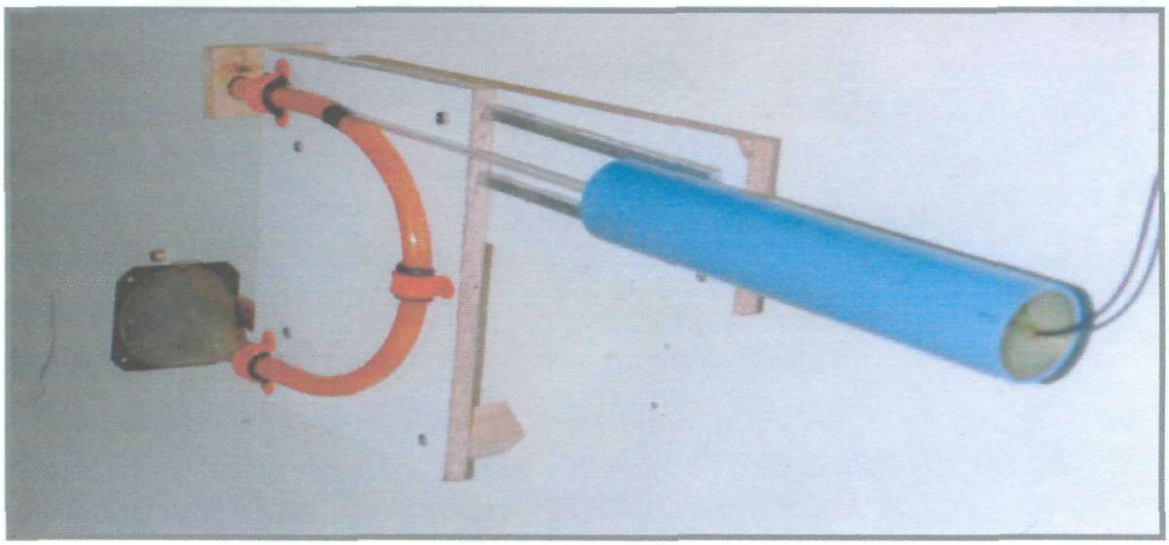
ANEXO 3

3. Primer y segundo diseño para la determinación del coeficiente de absorción acústica de la palta.

3.1 Primer diseño



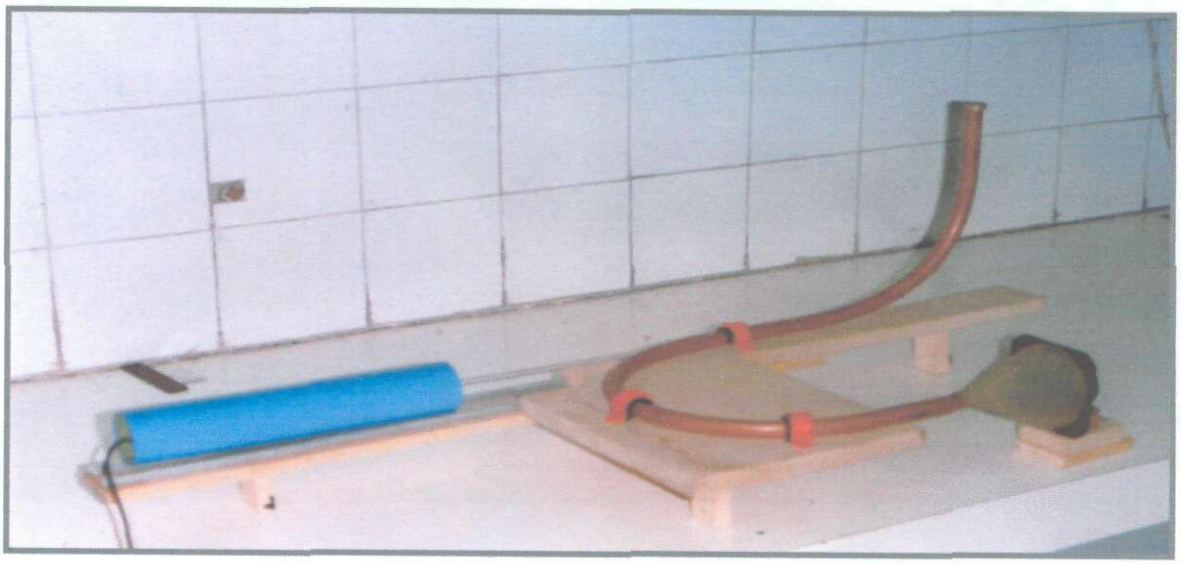
3.2 Segundo diseño



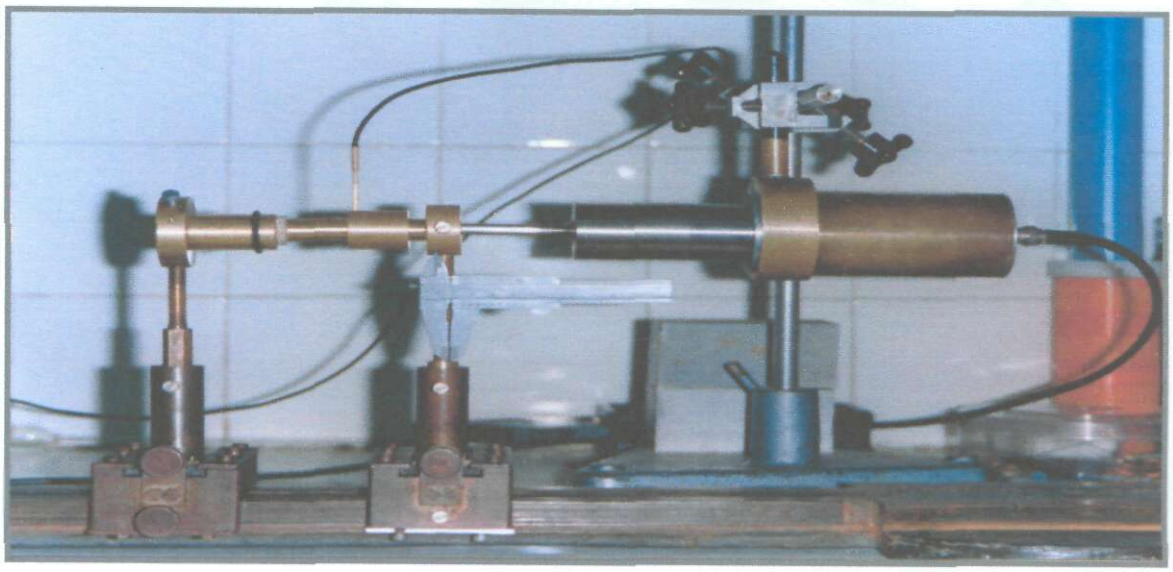
ANEXO 4

4. Diseños 3 y 4 para la determinación del coeficiente de absorción acústica de la palta.

4.1 Tercer diseño



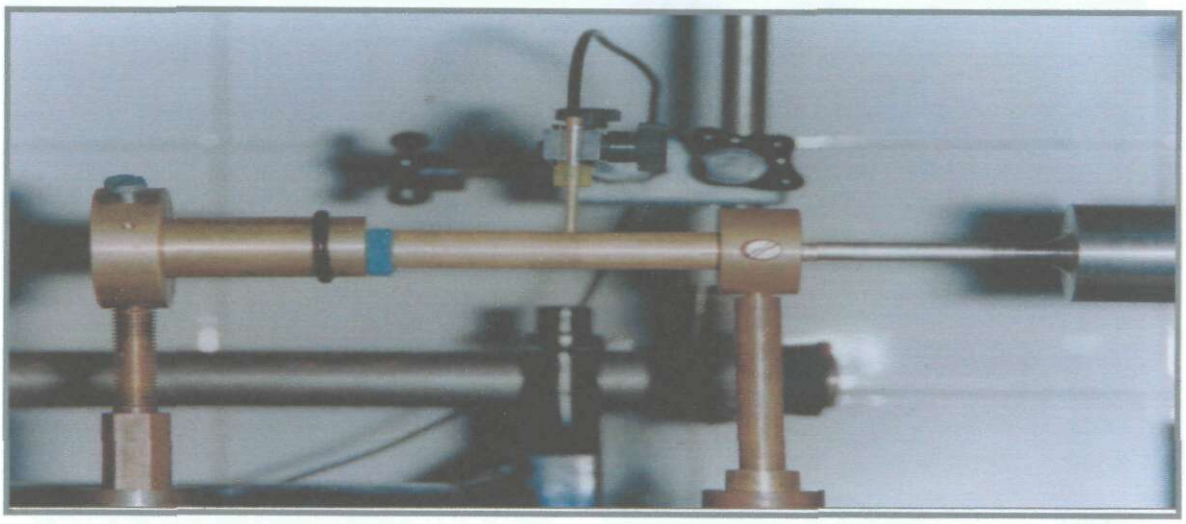
4.2 Cuarto diseño



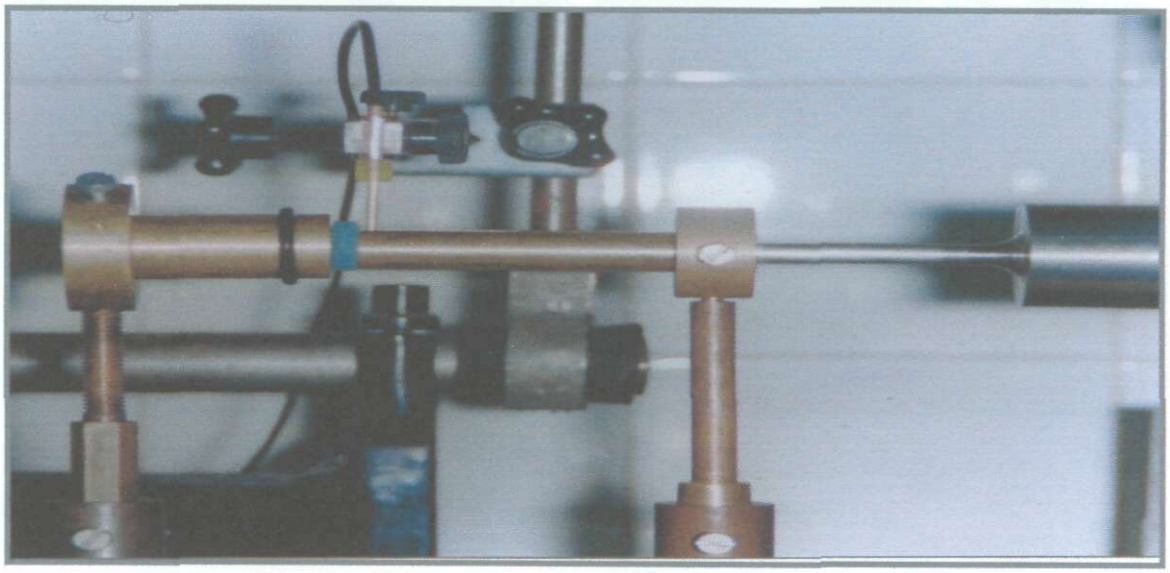
ANEXO 5

5. Quinto y sexto diseño para la determinación del coeficiente de absorción acústica de la palta.

5.1 Quinto diseño

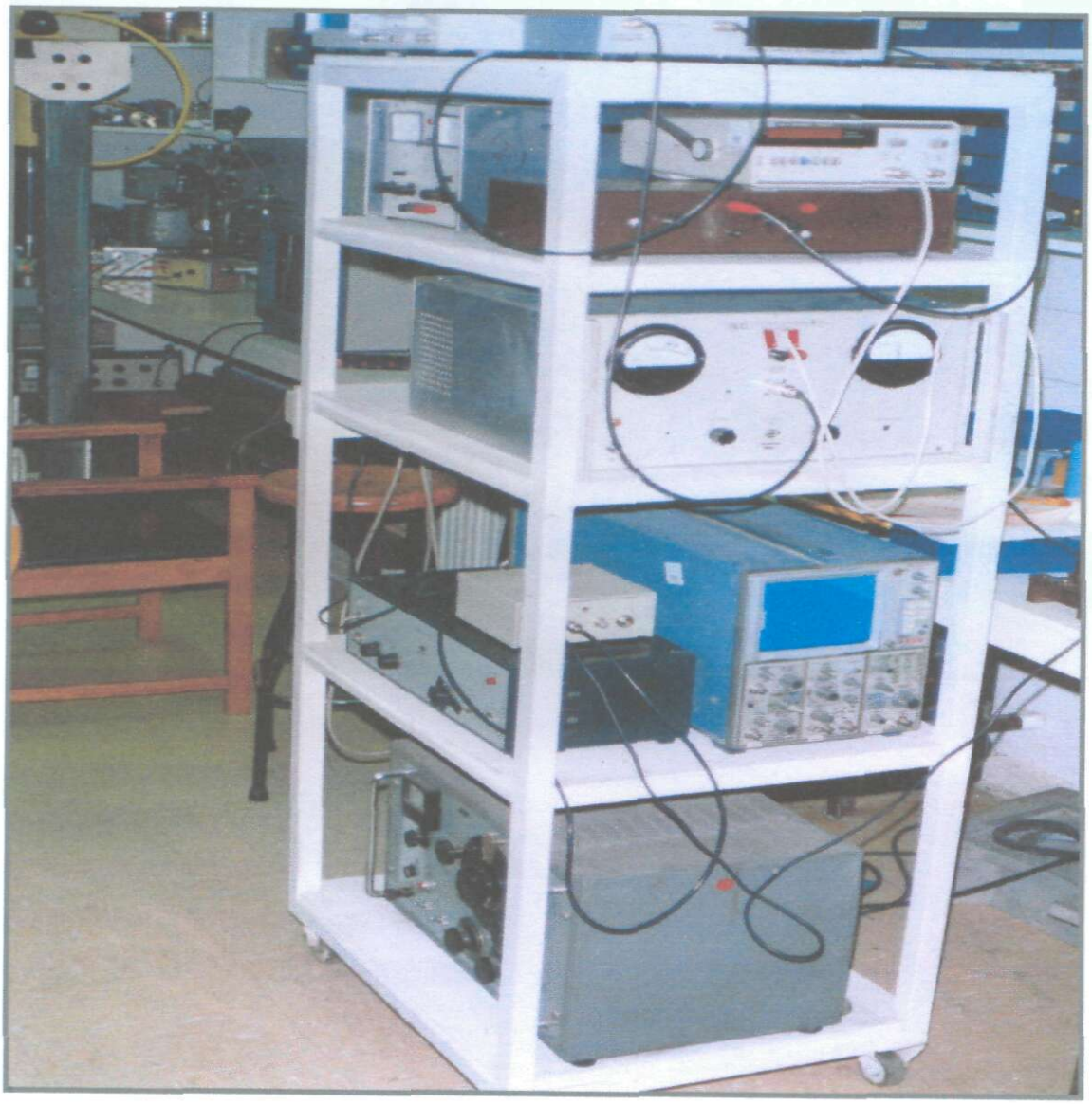


5.2 Sexto diseño



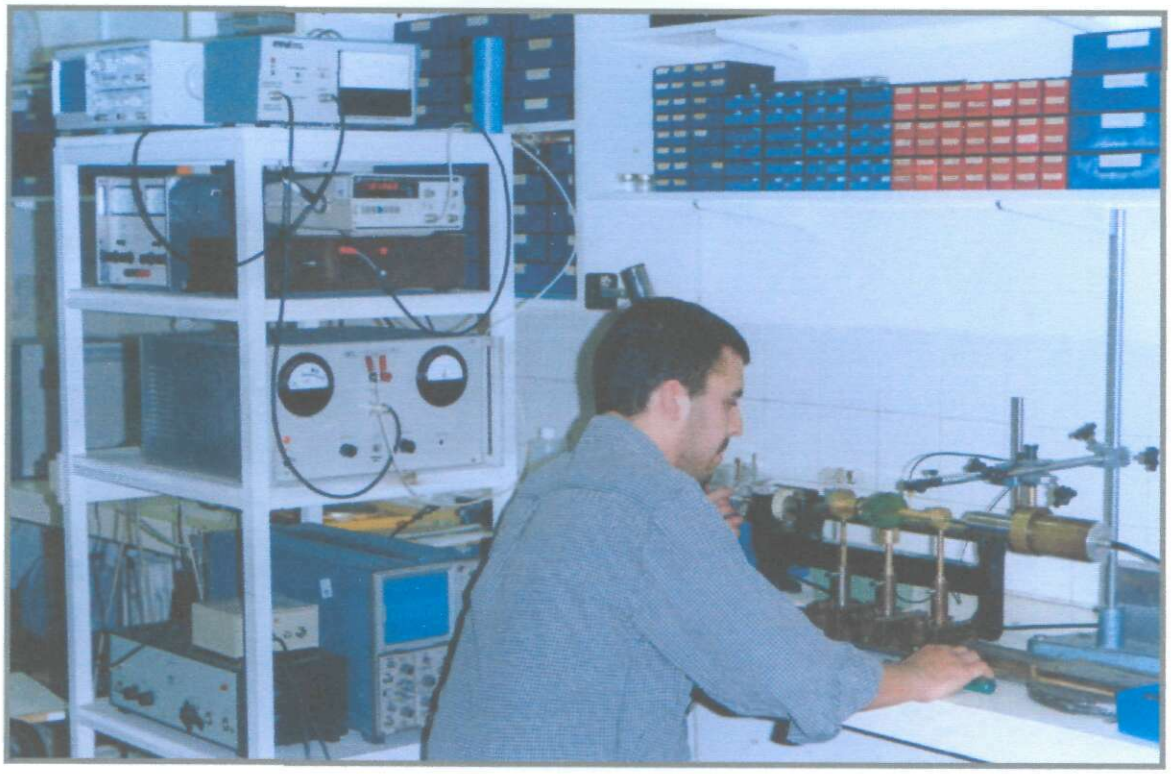
ANEXO 6

6. **Conjunto de equipos con los cuales se realizaron los ensayos.**



ANEXO 7

7. Medición del coeficiente de absorción acústica de la palta



ANEXO 8

8. Estimación lineal para firmeza del fruto en función de su coeficiente de absorción para 144 horas de almacenamiento a 20°C.

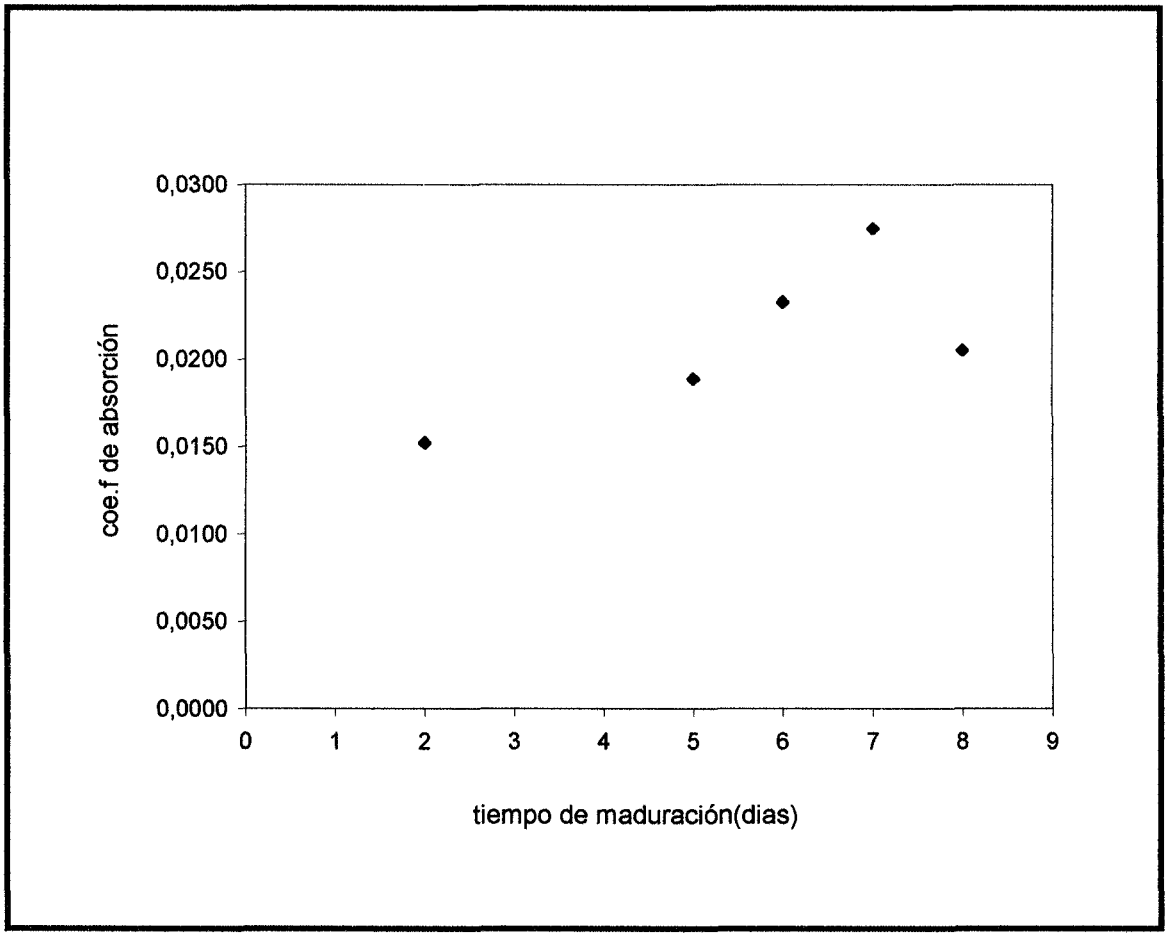
$Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error
A	43,7893	2,95716
B	-757,06124	69,75266

R	SD	N	P
-0,98344	2,23136	6	4,08962E-4

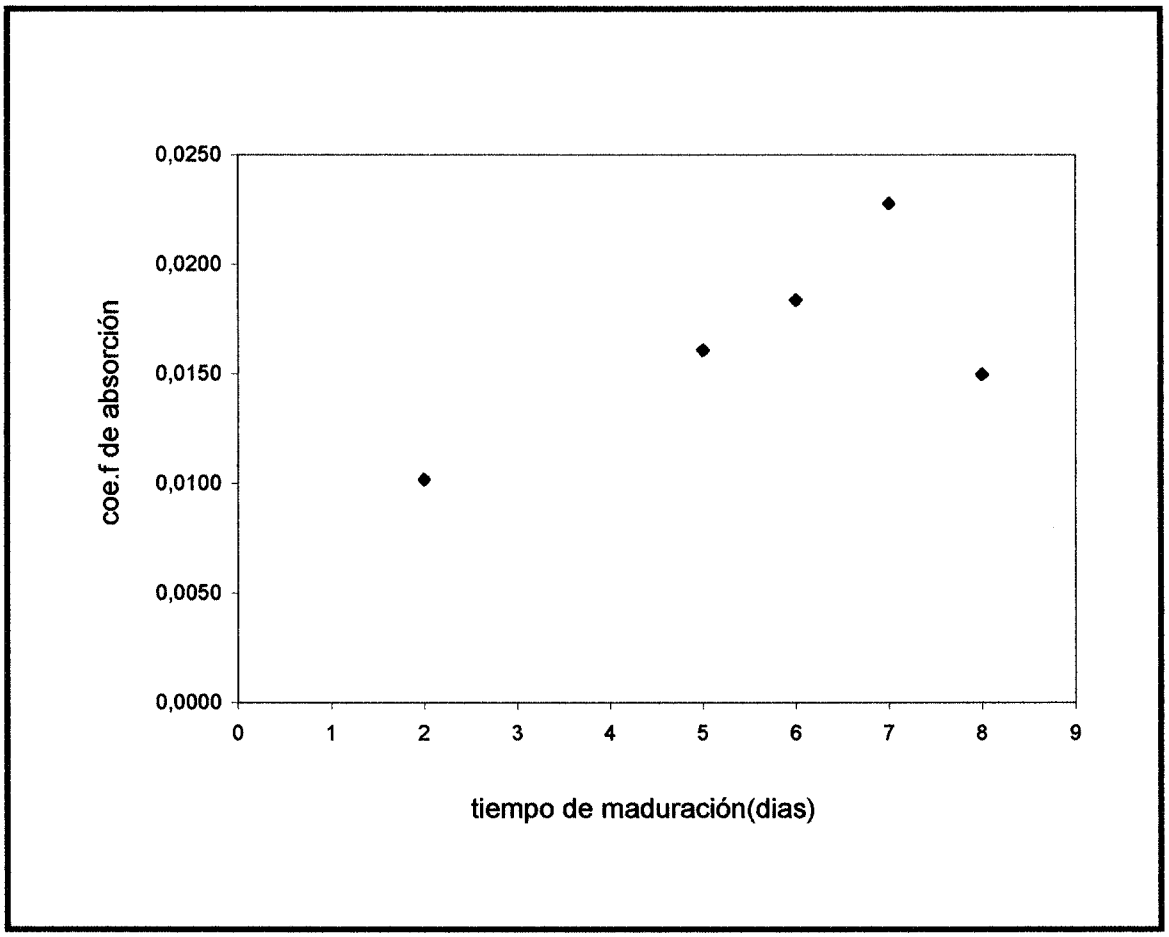
ANEXO 9

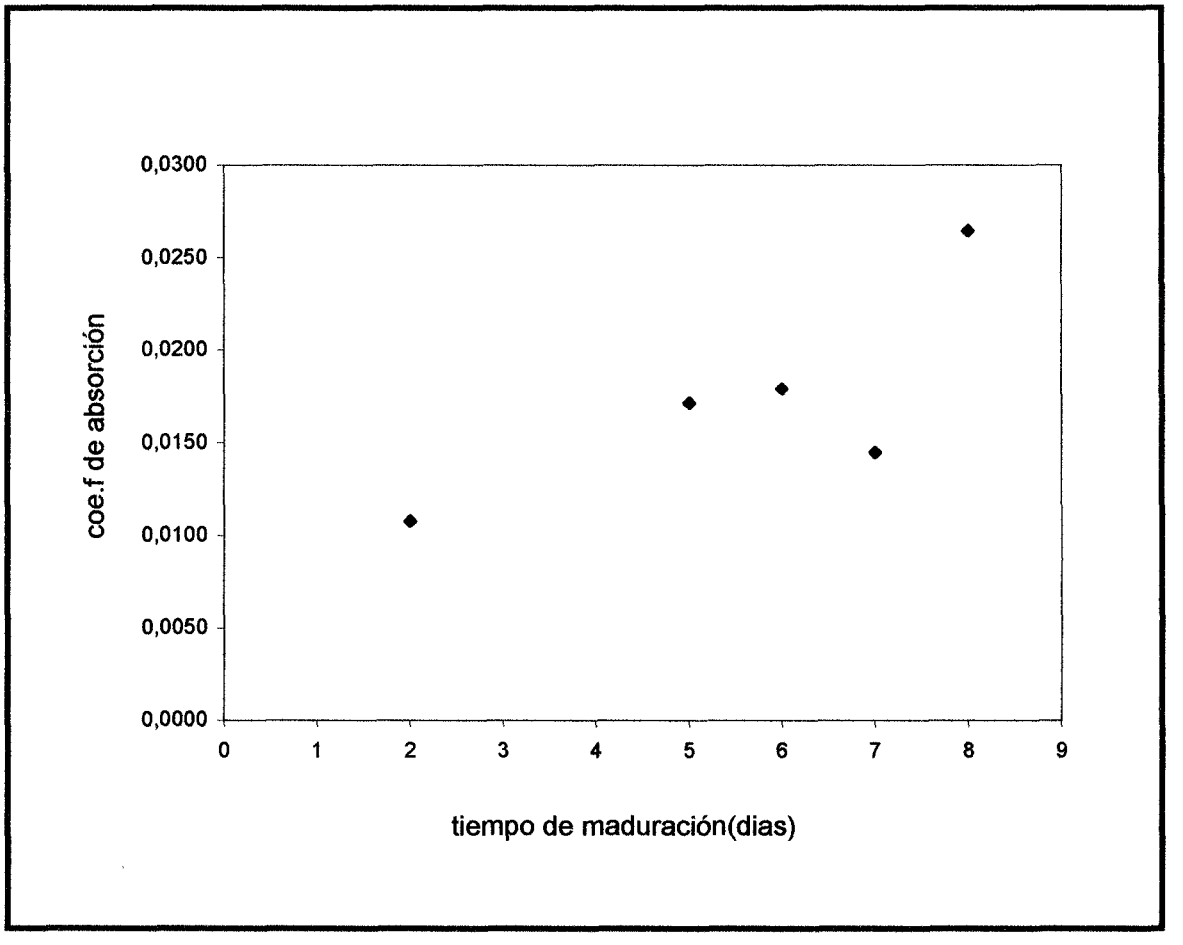
9. Coeficiente de absorción de onda de un fruto en función del tiempo de maduración (palta variedad negra de la cruz).



ANEXO 10

10. Coeficiente de absorción de onda de un fruto en función del tiempo de maduración (palta variedad fuerte).



ANEXO 11

11. Coeficiente de absorción de onda en función del tiempo de maduración (palta variedad de hass).