

**ESCUELA SUPERIOR  
POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Pruebas Experimentales con pupas de Sitotroga Cerealella Irradiadas con  
Ondas Electromagnéticas de 9 GHz**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de  
Ingeniero en Electricidad**

**Especialización: ELECTRONICA**

**Presentada Por:**

**Gomer Abel Rubio Roldán**

**Guayaquil-Ecuador**

**1686**

## A G R A D E C I M I E N T O

Al SEÑOR, Creador de los Cielos y la Tierra

Quiero dejar constancia de mi sincero agradecimiento a quienes de una u otra forma brindaron su ayuda y colaboración para la realización de este trabajo; muy especialmente:

al ING. CARLOS BECERRA, Director de Tesis.

A los ingenieros DAVID ALAVA y MIRIAM ARIAS del INIAP.

Al ING. EDUARDO MOLINA, Director del Instituto de Física.

Y a todos aquellos que hicieron posible mi formación:

A MI FAMILIA

AL M.C. NELSON PAZ

A MIS PROFESORES

A MIS AMIGOS

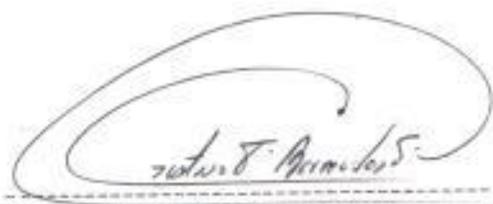
DEDICATORIA

AL SEÑOR

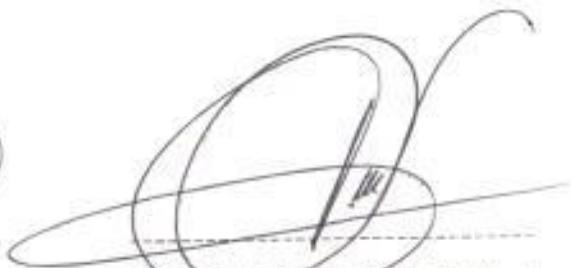
A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

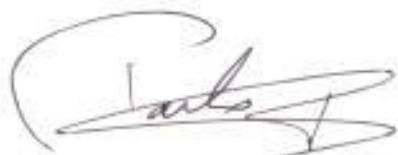
A ANY



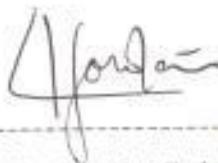
ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.  
SUB-DECANO DE LA FACULTAD  
DE INGENIERIA ELECTRICA



ING. CARLOS BECERRA L.  
DIRECTOR DE TESIS



ING. PEDRO CARLO  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. CARLOS JORDAN  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

## DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



GOMER ABEL RUBIO ROLDAN

## RESUMEN

Este es un estudio experimental, de tipo preliminar, que se efectúa por primera vez en el Ecuador sobre los efectos que la radiación de microondas de bajo nivel produce sobre el lepidóptero *Sitotroga Cerealella* (palomilla de los cereales), que infesta los granos almacenados de arroz y maíz, con la finalidad de determinar si es posible un control de esta plaga.

Las irradiaciones se llevaron a cabo en guía de onda y en espacio libre (utilizando una antena bocina), irradiándose pupas y granos infestados con pupas, con potencia de 8 y 15 mW y a una frecuencia de 9 GHz. Los resultados fueron tabulados haciéndose una clasificación de adultos normales, adultos deformes y pupas muertas. Luego, se graficaron los porcentajes de deformaciones y los porcentajes de muertes v.s. la forma de irradiación, para luego hacer un análisis de los mismos, sin observarse diferencias significativas en las irradiaciones llevadas a cabo sea en guía de onda o en espacio libre. Es de hacer notar que se observó un resultado positivo en las irradiaciones sobre anfitrión-pupas. El porcentaje de muertes fue ligeramente significativo en comparación con los de control (7.3% en guía de onda y 10% en espacio libre, de diferencia).

Se determinó que el sistema reproductivo del insecto se ve afectado

y, por consiguiente, se hace necesario realizar un estudio más detallado (variando la potencia, la frecuencia, irradiando huevecillos) que defina con exactitud la potencialidad de dichos efectos.

## INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	6
INDICE GENERAL.....	8
INDICE DE ABREVIATURAS.....	11
INDICE DE FIGURAS.....	14
INDICE DE TABLAS.....	17
INTRODUCCION.....	18
CAPITULO I	
GENERALIDADES SOBRE CONTROL DE INSECTOS .....	21
1.1 Temática mundial sobre el control de insectos.....	22
1.2 Control de plagas mediante RF.....	27
1.3 Efectos biológicos de las altas frecuencias.....	29
1.3.1 Efectos térmicos.....	29
1.3.2 Efectos no-térmicos.....	32
1.4 Aspectos teóricos de la interacción campo-insecto-material anfitrión.....	33
1.5 Variedad de insectos a tratar.....	39
1.6 Resultados de otras pruebas.....	40
1.6.1 Efectos teratogénicos.....	41
1.6.2 Efectos sobre la reproducción.....	42
CAPITULO II	
CIRCUITO DE MICROONDAS .....	44
2.1 Generalidades del experimento.....	44

	Pág.
2.2 Diagrama de bloques del circuito.....	49
2.2.1 Irradiación en ensamblaje.....	49
2.2.2 Irradiación a espacio libre.....	50
2.3 Descripción de los equipos y elementos.....	50
2.3.1 Oscilador de barrido.....	51
2.3.2 Adaptador.....	56
2.3.3 Atenuador.....	57
2.3.4 Filtro pasa-bajo.....	61
2.3.5 Acoplador direccional.....	65
2.3.6 Elemento detector.....	71
2.3.7 Medidor de potencia.....	75
2.3.8 Terminación.....	78
2.3.9 Antena tipo bocina.....	82
 CAPITULO III	
PRUEBAS EXPERIMENTALES EN GUIA DE ONDA .....	87
3.1 Procedimiento.....	87
3.2 Tabulación de resultados.....	89
 CAPITULO IV	
PRUEBAS EXPERIMENTALES A ESPACIO LIBRE .....	94
4.1 Procedimiento.....	94
4.2 Tabulación de resultados.....	95
 CAPITULO V	
EVALUACION Y CORRELACION DE RESULTADOS .....	98
5.1 Evaluación de resultados.....	98
5.2 Correlación con otros resultados.....	99
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	105

	Pág.
APENDICE A: Armónicos de Zona.....	109
APENDICE B: Fotografías.....	115
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	125

## INTRODUCCION

El estudio de los efectos que la radiación de microondas produce sobre las plagas en la agricultura es una de las investigaciones que se está llevando a cabo en varios países del mundo, tales como EE.UU. España, Canadá, etc.

Los resultados arrojados por algunas de estas investigaciones son prometedores y nos lleva a pensar que, en un futuro no muy lejano, el control de las plagas pueda hacerse utilizando radiación no-ionizante (microondas), la misma que no presenta los problemas de contaminación que ocasionan los agentes químicos y radioactivos, ni entraña los peligros y las precauciones de manejo de materiales radioactivos.

En nuestro país, los controles de plaga se los hace utilizando los métodos convencionales, tales como el control químico, biológico y varietal. El objeto del presente trabajo consiste en hacer un estudio de los efectos que la radiación de microondas produce sobre la Sitotroga Cereallega (palomilla de maíz), con la finalidad de ver si es posible lograr un control de este insecto en los granos almacenados tanto del maíz como del arroz.

Los estudios teóricos desarrollados hasta el momento han tenido como punto de partida la técnica de insectos estériles (IIS) propuesta por

Knipling en 1938, y que consistía en liberar un gran número de machos estériles en el seno de una población natural, para reducir el número de individuos en la generación siguiente e incluso llegar a la total eliminación de la especie.

Las investigaciones sobre el *Tenebrio Molitor*, realizadas por H.S. Whitney (9) lo llevaron a la conclusión de que la respuesta a la irradiación de bajo nivel de potencia (10, 20, 40 y 100 mW), es una función de las condiciones fisiológicas de las células y los tejidos irradiados, respuesta que incluso puede variar ampliamente en una misma especie.

Esta conclusión nos llevó a realizar nuestro trabajo investigativo sobre la *Sitotroga Cerealella* y que lo trataremos en el presente escrito. El mismo se desarrollará en la siguiente forma: I) Generalidades sobre control de insectos; II) Circuito de microondas; III) Pruebas experimentales en guía de onda; IV) Pruebas experimentales a espacio libre; V) Evaluación y correlación de resultados.

De los estudios realizados se concluyó que existe una relación entre la irradiación de bajo nivel de potencia y las condiciones fisiológicas de las células y tejidos. Además de que el sistema termoregulador de la *Sitotroga Cerealella* controló eficazmente los efectos teratogénicos.

Asimismo, el observarse una mayor movilidad en los adultos provenientes de pupas tratados, nos llevó a concluir que el sistema reproductivo

del insecto sí se ha afectado, puesto que consume un "exceso de energía" que debe extraerlo de las proteínas destinadas a la producción de huevecillos.

La correlación de los resultados se hizo con los trabajos realizados por Whitney (9) y Page (2), quienes llegaron a conclusiones similares a las nuestras. La limitación surgida en el número de pupas tratadas se originó al no poder coordinar nuestro trabajo con el INIAP, por lo que el autor de este escrito recomienda una profundización de las investigaciones realizadas, cooperación directa con el INIAP,

## CAPITULO I

### GENERALIDADES SOBRE CONTROL DE INSECTOS

En el presente capítulo analizaremos -en una forma general-, las diferentes técnicas que se han desarrollado para el control de insectos en la agricultura; así como los estudios que se están realizando en la actualidad, tendientes a lograr un control de plagas utilizando alta frecuencia.

Uno de los estudios que se está llevando a cabo en varios centros de investigación, es el de observar los efectos biológicos que la radiación de alta frecuencia produce sobre los insectos, irradiándose para ello huevos, larvas, l/o pupas de varios tipos de plagas.

En la sección 1.4 describiremos un modelo teórico de la interacción campo-insecto-material anfitrión, con la finalidad de cuantificar la potencia que es absorbida por un insecto, al encontrarse embebido en un campo electromagnético.

En nuestro país, el organismo encargado de estudiar el control de plagas en la agricultura es el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP. Basándonos en la información proporcionada por este Instituto, haremos un estudio de las variedades de insectos que asolan a los productos almacenados en nuestro país, y decidiremos sobre que

tipo de plaga es la más adecuada para nuestros experimentos.

Finalmente, resumiremos los resultados obtenidos por otros investigadores en este campo, lo que posteriormente nos servirá para hacer una evaluación de nuestros resultados.

### **1.1 La temática mundial del control de insectos**

El hombre siempre ha tenido conflictos con los insectos. Cuando emergió por primera vez como tal le acompañaban ya las pulgas y los piojos, fue pasto de los mosquitos y atormentado por las moscas.

A través de la historia el progreso del hombre se ha basado esencialmente en las modificaciones de diversos factores de su medio ambiente y en hacerlo más adecuado para su supervivencia y expansión. Pero todo cambio que beneficiaba al hombre, también beneficiaba a un gran número de insectos.

El crecimiento de las poblaciones humanas permitió un gran incremento de los insectos ectoparásitos, tales como las pulgas y los piojos, además de las enfermedades transmitidas por los insectos. Cuando las grandes ciudades surgieron, éstas fueron repetidamente barridas por brotes de las enfermedades provocadas por varios insectos, en la misma forma que la Roma Imperial fue diezmada por la peste bubónica en el Siglo II de nuestra era.

Los insectos se convirtieron en un factor a tomar en cuenta en relación con los alimentos y la salud. Cuando el hombre empezó a almacenar los alimentos, estos fueron atacados por huestes de insectos que no habían tenido significación en el medio ambiente. Actualmente, los insectos destruyen anualmente miles de toneladas de alimentos almacenados, a pesar de los generalizados y caros programas de control.

Los avances conseguidos por el hombre en el transporte ha permitido que ciertas especies de insectos hayan sido llevados a continentes nuevos para ellos, donde han encontrado climas favorables, succulentos y gratos huéspedes cultivados, y una independencia respecto a sus enemigos naturales, los cuales habían mantenido limitado su número en los lugares de origen. A veces los resultados han sido desastrosos ocasionándose pérdidas en las cosechas por millones de dólares. Solamente en los Estados Unidos, en el año de 1952, las pérdidas ocasionadas por las plagas se aproximó a los 1500'000 000 de dólares.

En 1945 y 1946 la introducción comercial del insecticida sintético DDT anunció una revolución económica en el costo del control de insectos, debido a que hasta esa fecha la lucha efectiva contra las plagas de insectos con insecticidas había sido una empresa relativamente cara.

El DDT y los insecticidas sintéticos descubiertos posteriormente, como el Hexacloruro de Benceno y el Dieldrín, probaron ser tan

eficaces a pequeñas dosis, que el costo de un tratamiento efectivo se redujo enormemente. Sin embargo, han salido al paso una serie de dificultades tales como: toxicidad para las plantas de algunas fórmulas, estirpes de insectos insecticidas-resistentes, y contratiempos diversos provocados por los enormes cambios ecológicos en las zonas tratadas, lo que ha hecho restringido el uso de los insecticidas.

Actualmente existen algunas formas desarrolladas para el control de insectos, entre las que podemos mencionar:

**Control Químico:** Basado en el uso de insecticidas, que deriva de la palabra latina "insectos" y "matar". Generalmente los insecticidas son la primera arma que se usa para controlar las plagas de insectos. Se los usa por las siguientes razones:

- 1) Son muy efectivos,
- 2) Su efecto es inmediato,
- 3) Pueden controlar con rapidez poblaciones grandes de insectos;
- 4) Pueden emplearse conforme se los necesita.

Rara vez pueden encontrarse métodos alternativos de control que reúnan todas estas características. Sin embargo, hay que tomar muy en cuenta los problemas ocasionados por el uso de los insecticidas y que ya fueron mencionados con anterioridad.

**Control por la técnica de "insectos estériles (TIS)":** La técnica

"insectos estériles (TIS)" propuesta en 1938 por Knippling, consistía en la liberación de un gran número de machos estériles en el seno de una población natural para reducir el número de individuos en la generación siguiente e incluso llegar a la total eliminación de la especie. El primer experimento de campo utilizando esta técnica, se lo llevó a cabo en la Isla de Curacao en 1954, para controlar el Gusano Tornillo (*COCHLIOMYA HOMINIVORAX*), obteniéndose muy buenos resultados.

En los años de 1962 a 1966, se llevó a cabo un programa completo de irradiación de la misma plaga. El éxito fue completo. El gusano tornillo fue erradicado de Texas, New México y California con el TIS.

No hay dudas, el éxito inesperado y sin precedentes, estimuló en todo el mundo experimentación adicional. Esta tendencia optimista fue injustificada y el apresuramiento ocasionó muchos fracasos que ocasionaron dudas a agencias financieras, gobiernos y agricultores, acerca de la viabilidad y confiabilidad del método. Posiblemente si no se hubieran apresurado tanto y los esfuerzos se hubieran concentrados, a la presente estaríamos en mejor posición de la que ahora nos encontramos.

El programa TIS adquirió fuerza en 1972, cuando se puso en marcha un programa en la región costera de Florida para controlar la mosca MED-mosca del mediterráneo-, seleccionándose para ello un área experimental de 1000 hectáreas.

El área de liberación estaba rodeada por una zona-barrera donde se rociaba frecuentemente con cebo-malathion (cada 10 días), para prevenir la migración de moscas de la periferia al área de liberación. El área de liberación estaba "limpia" de moscas MED cuando comenzaron las liberaciones a mediados de abril y se terminaron en julio de 1973. Desde el aire se liberaron un total de 80 millones de moscas estériles (tratamiento pupal con 9 Krad).

La población de la mosca MED fuera del área de liberación y de la zona barrera incrementó notablemente durante junio y julio. La zona-barrera tratada con malathion y el área de liberación sin embargo, se mantuvieron "limpias" de moscas hasta julio. Durante este mes (julio), la presión de la población de moscas MED que estaba afuera se hizo muy alta, y tanto el área de liberación como la zona-barrera se infestaron con moscas MED inmigrantes. El experimento demostró que el método TIS no es aplicable en áreas relativamente pequeñas, que están rodeadas por áreas infestadas.

Las conclusiones a que se ha llegado sobre el "uso de radiación ionizante en agricultura", nos indica que el método de la TIS debe ser usado para la erradicación de poblaciones incipientes (1); y en realidad se la usó con éxito no hace mucho en el programa de irradiación de la mosca MED en los Angeles.

**Control Varietal o Genético:** Este tipo de control consiste en cruzar variedades de plantas que son resistentes o tolerables a ciertas plagas, con otras de alta producción. El resultado que se obtiene

son plantas tolerables a ciertas plagas y que además son de alta productibilidad.

**Control Biológico:** Se lo realiza con parásitos o pedradores de plagas; que son virus, bacterias u hongos que viven a expensas de los insectos. Este tipo de control está presente en la naturaleza. Con la finalidad de aumentar y multiplicar su eficiencia, se suele cultivar las bacterias y criar los insectos en el laboratorio, para luego soltarlos en el medio ambiente.

Todos los tipos de control de plagas a excepción de la técnica TIS, son llevados a cabo por el INIAP. Este Organismo tiene como finalidad suministrar a los agricultores nuevas variedades de plantas que mejoren la producción; además de suministrar la información necesaria para el control de plagas y uso de fertilizantes adecuados para dicha variedad.

## 1.2 El control de plagas mediante RF

Las primeras pruebas de irradiación de insectos con RF datan de hace casi 50 años y estaban dirigidas a la determinación de los niveles que podrían provocar la muerte de insectos que infectan determinados productos, tales como cereales almacenados, productos alimenticios empaquetados, madera,....., para reemplazar las técnicas tradicionales de lucha química.

Recientemente, con el descubrimiento de los efectos no térmicos

tales como los que repercuten en la capacidad reproductora, se ha pensado en nuevas aplicaciones agrícolas de interés: Por una parte, un aumento en la capacidad reproductora podría aprovecharse en la lucha contra plagas, potenciando la capacidad reproductora de especies parásitas de las que se desea combatir.

Por otra parte, cualquier disminución o incluso anulación total de la capacidad reproductora (esterilización) abriría un amplio campo a la RF. La idea consistiría en liberar un gran número de machos estériles en el seno de una población natural, para reducir el número de individuos en la generación siguiente e incluso llegar a la eliminación de la especie (2).

Esto último traería consigo problemas ecológicos, por lo que lo más indicado es una reducción en la plaga a tratarse.

El método mencionado anteriormente se ha empleado con éxito en numerosas ocasiones en países como España, utilizándose agentes químicos y radioactivos (radiación gamma) para producir la esterilización.

Las ventajas de la radiación no-ionizante sobre los dos métodos anteriores son patentes, por lo que se hace necesario profundizar, aunque sea de manera empírica -debido al poco conocimiento de la interacción campo electromagnético-ser vivo-, el estudio de los efectos de la RF sobre los insectos.

### 1.3 Efectos biológicos de las altas frecuencias

Los efectos biológicos de las altas frecuencias pueden ser clasificados en dos grupos: Los Efectos Térmicos, que son producidos por una elevación de temperatura en los tejidos; y los Efectos No-Térmicos (o morfológicos) que se producen a niveles inferiores de radiación a los considerados como peligroso. A continuación analizaremos los dos tipos de efectos biológicos.

#### 1.3.1 Efectos Térmicos

El efecto más conocido y mejor estudiado es el calentamiento de los tejidos biológicos. Bajo el punto de vista electromagnético, los tejidos biológicos se comportan como dieléctricos con pérdidas, siendo descritos por medio de su constante dieléctrica compleja:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1.1)$$

La existencia de la parte imaginaria en la constante dieléctrica compleja ( $\epsilon''$ ) es la que da lugar al calentamiento del tejido.

Si se estudia la propagación de una onda plana que incide en un tejido homogéneo semi-infinito (fig. 1.1), se encuentra que los campos eléctricos y magnéticos en un punto del interior del mismo obedecen a las expresiones:

$$E = E_0 e^{-\alpha z} \quad (1.2)$$

$$H = \frac{\hat{z} \cdot E_0}{\eta} e^{-\gamma z} \quad (1.3)$$

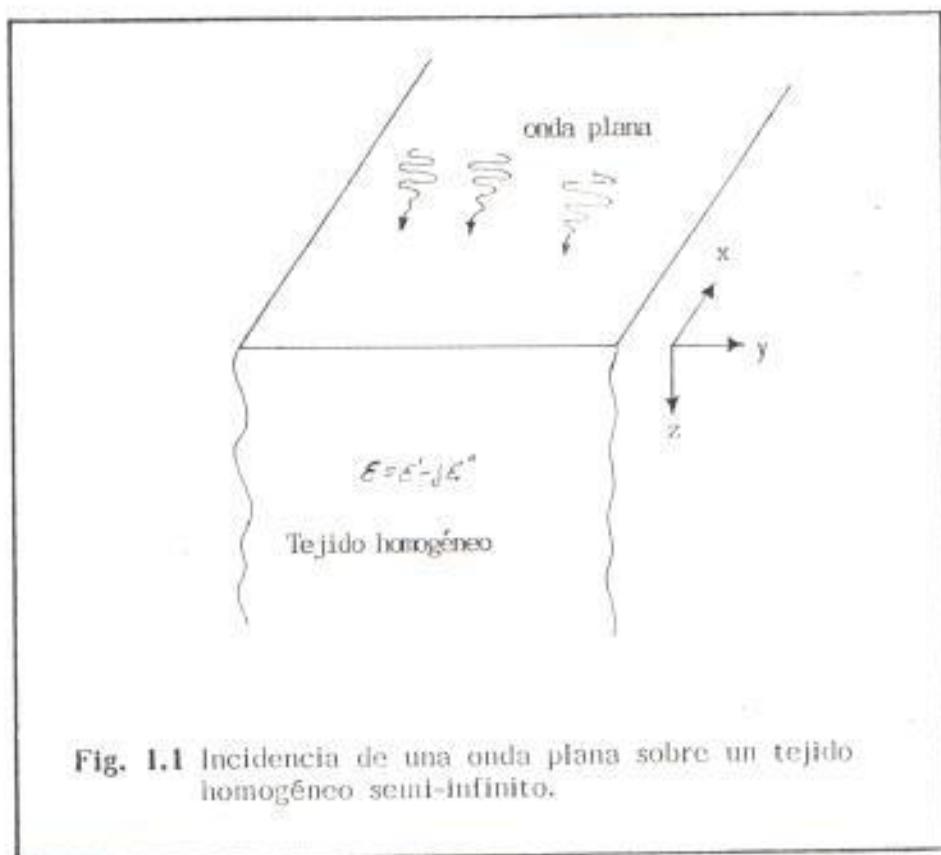
donde  $z$  es la distancia del punto a la superficie,  $\hat{z}$  el vector unitario en la dirección de propagación,  $\gamma$  es la constante de propagación que viene dada por:

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu(\epsilon' - j\epsilon'')} \quad (1.4)$$

y  $\eta$  es la impedancia intrínseca del medio

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon' - j\epsilon''}} \quad (1.5)$$

De las ecuaciones (1.2), (1.3) y (1.4) se deduce que los campos se atenúan de forma exponencial al propagarse en el medio dieléctrico con pérdidas.



La potencia transmitida por unidad de superficie, a una profundidad  $z$  vale:

$$P_t = P_0 e^{-2\alpha z} \quad (1.6)$$

donde  $P_0$  es la potencia transmitida en  $z=0$  y  $\alpha$  la constante de atenuación

$$\alpha = \text{Re}(\beta) = \omega \sqrt{\mu \epsilon / 2} \left( \sqrt{1 + (\epsilon''/\epsilon')^2} - 1 \right) \quad (1.7)$$

denominándose tangente de pérdidas al término

$$\tan \gamma = \epsilon''/\epsilon' \quad (1.8)$$

nomenclatura que es muy utilizada en el lenguaje técnico.

La potencia electromagnética que se convierte en calor, por unidad de longitud, será igual a la disminución de la potencia transmitida

$$P_c(z) = \frac{dP_t}{dz} = 2\alpha P_0 e^{-2\alpha z} \quad (1.9)$$

Se define la profundidad de penetración, como la distancia a la cual la potencia transmitida queda dividida por  $e^{-1}$ :

$$\delta_s = 1/2\alpha \quad (1.10)$$

Puede calcularse la potencia convertida en calor en una determinada longitud  $z$  a través de:

$$P_{ct} = \int_{z_1}^{z_2} 2\alpha P_0 e^{-2z/\delta_s} dz = P_0 \left( e^{-z_1/\delta_s} - e^{-z_2/\delta_s} \right) \quad (1.11)$$

De las fórmulas (1.6), (1.7) y (1.10) se pueden extraer las

siguientes conclusiones:

1. A medida que se incrementa la frecuencia,  $\alpha$  aumenta y la potencia convertida en calor también aumenta, para  $P_0 = \text{cte.}$
2. La potencia convertida en calor disminuye a medida que  $Z$  aumenta.
3. A mayor frecuencia, la potencia que penetra en el interior del dieléctrico disminuye más rápidamente con  $Z$ .

En lo respecta a tejidos biológicos, la potencia que absorben producirá una elevación de la temperatura que dependerá de los mecanismos de refrigeración del mismo. La distribución de los campos eléctricos y magnéticos, que producen el calentamiento en el interior del tejido, depende entonces de la frecuencia, de la configuración de la fuente, de la geometría del tejido y de las propiedades dieléctricas del mismo. La distribución de la temperatura no coincide con la de los campos, debido a las propiedades térmicas de los tejidos y a mecanismos neurocirculatorios. Si se excede la capacidad de regulación térmica del tejido, se puede producir la destrucción del mismo.

### 1.3.2 Efectos No-Térmicos

Una de las pruebas más fehacientes aportadas como demostración de la existencia de efectos no-térmicos producidos por las microondas es el desarrollo anormal de las pupas de insectos sometidas a irradiación, además de efectos ocasionados sobre la capacidad reproductora.

Las experiencias de Carpenter y Livinstone con pupas del coleóptero *Tenebrio Molitor* sometidas a radiación electromagnética de 10Ghz han puesto de manifiesto la capacidad de la RF para inducir en los insectos efectos teratogénicos tales como metamorfosis incompleta, falta de apéndices, elitros perforados....(2).

Junto a otros efectos morfológicos se han observado otros dos fenómenos: un incremento en el período de pupación y una disminución de la vida del insecto adulto.

Todos estos fenómenos en el *Tenebrio Molitor* han sido corroborados por otros investigadores (3), (4), (5), (6), cuyas experiencias han permitido extraer conclusiones que las resumimos en la sección 1.7.

#### **1.4 Aspectos teóricos de la interacción campo-insecto-material anfitrión**

Para modelar la interacción del campo electromagnético sobre el insecto, y el material anfitrión (es decir, grano almacenado, plantación, etc.) el problema se lo presenta como el de una esfera

de constante dieléctrica uniforme  $\epsilon'$  (insecto) embebida en un medio muy extenso de constante dieléctrica uniforme  $\epsilon_g$  (grano) (7). Resolvamos este problema e intentemos encontrar la relación que existe entre las intensidades de los campos en los dos medios.

Supondremos a la esfera dieléctrica de radio  $a$ , embebida en un medio que contiene un campo eléctrico inicialmente uniforme  $E_g$ . Supondremos que el dieléctrico es lineal isotrópico y homogéneo, y que no tiene carga. Tomaremos un sistema de coordenadas con su origen en el centro de la esfera y la dirección de  $E_g$  como la dirección polar (dirección  $z$ ). El potencial puede expresarse entonces como una suma de los armónicos de zona (Apéndice A).

$$\begin{aligned} \psi(r, \theta) &= C_0 r^{-1} P_0(\theta) + A_1 r P_1(\theta) + C_1 r^{-2} P_1(\theta) + A_2 r^2 P_2(\theta) + C_2 r^{-3} P_2(\theta) + \dots \\ &= A_0 + C_0 r^{-1} + A_1 r \cos \theta + C_1 r^{-2} \cos \theta + \frac{1}{2} A_2 r^2 (3 \cos^2 \theta - 1) + \\ &\quad \frac{1}{2} C_2 r^{-3} (3 \cos^2 \theta - 1) + \dots \end{aligned}$$

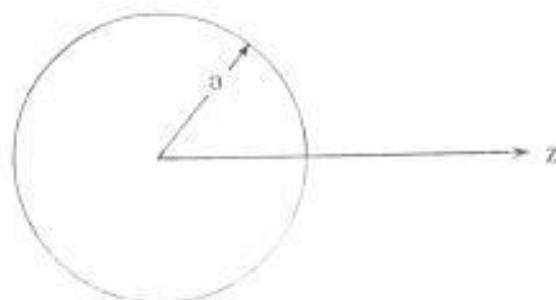


Fig. 1.2 Esfera dieléctrica

Donde las  $A$  y las  $C$  son constantes arbitrarias.

Las condiciones de frontera pueden ser satisfechas por medio de los dos armónicos de orden menor y escribimos:

$$\varphi_g(r, \theta) = A_1 r \cos \theta + C_1 r^{-2} \cos \theta \quad (1.12)$$

Para la región en el medio  $g$  en el exterior de la esfera, y

$$\varphi_i(r, \theta) = A_2 r \cos \theta + C_2 r^{-2} \cos \theta \quad (1.13)$$

Para la región del dieléctrico (medio  $l$ ). Las constantes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $C_1$  y  $C_2$  no se conocen y deben determinarse a partir de las condiciones en la frontera.

No es necesario el armónico  $r^{-1}$  porque su presencia implica una carga neta en la esfera. La constante  $A_0$  la podemos considerar cero, debido a que la necesitamos en ambas ecuaciones.

Lejos de la esfera, el campo eléctrico conservará su carácter uniforme, luego:

$$\varphi_g \rightarrow -E_g r \cos \theta$$

Por lo tanto,

$$A_1 = -E_g$$

En el centro de la esfera, si  $C_2 \neq 0$ , el potencial y campo eléctrico se volverían infinitos; puesto que esto no puede suceder en un dieléctrico desprovisto de cargas puntuales,  $C_2 = 0$ .

La continuidad del potencial a través de la zona interfacial insecto-grano requiere que  $\varphi_g = \varphi_i$  en  $r=a$ , o sea,

$$-E_g a + C_1 a^{-2} = \Lambda_2 a \quad (1.14)$$

La componente normal de  $\mathbf{D}$  en la zona interfacial es:

$$D_r = -\epsilon_r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (1.15)$$

Luego:

$$D_{gr} = -\epsilon_g (\Lambda_1 \cos \theta - 2C_1 r^{-3} \cos \theta) \quad (1.16a)$$

$$D_{ir} = \epsilon_i (\Lambda_2 \cos \theta - 2C_2 r^{-3} \cos \theta) \quad (1.16b)$$

La continuidad de  $D_r$  (no hay carga libre sobre la superficie del dieléctrico) requiere que  $D_{gr} = D_{ir}$  en  $r=a$ . Por lo tanto:

$$\epsilon_g (\Lambda_1 \cos \theta - 2C_1 r^{-3} \cos \theta) = \epsilon_i (\Lambda_2 \cos \theta - 2C_2 r^{-3} \cos \theta)$$

Sabemos que:

$$\Lambda_1 = 0, \quad C_2 = 0$$

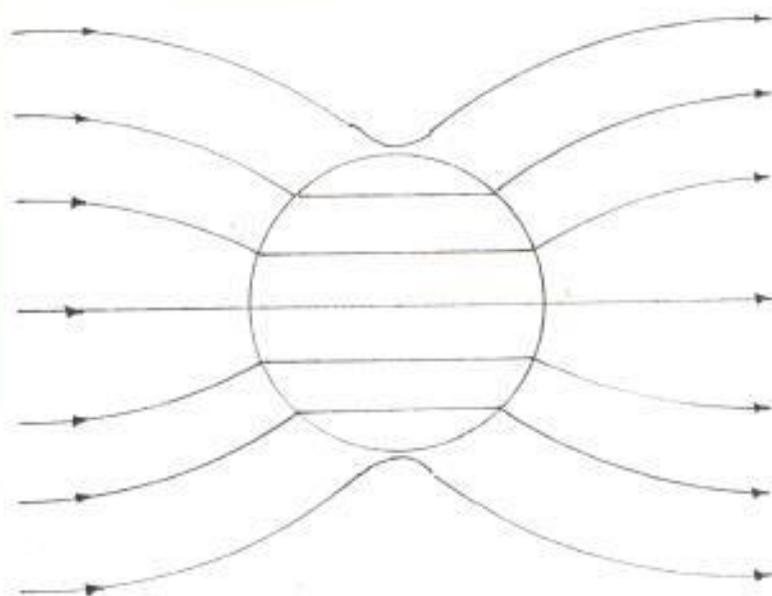
Luego:

$$E_g + 2C_1 r^{-3} = -\left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_g}\right) \Lambda_2 \quad (1.17)$$

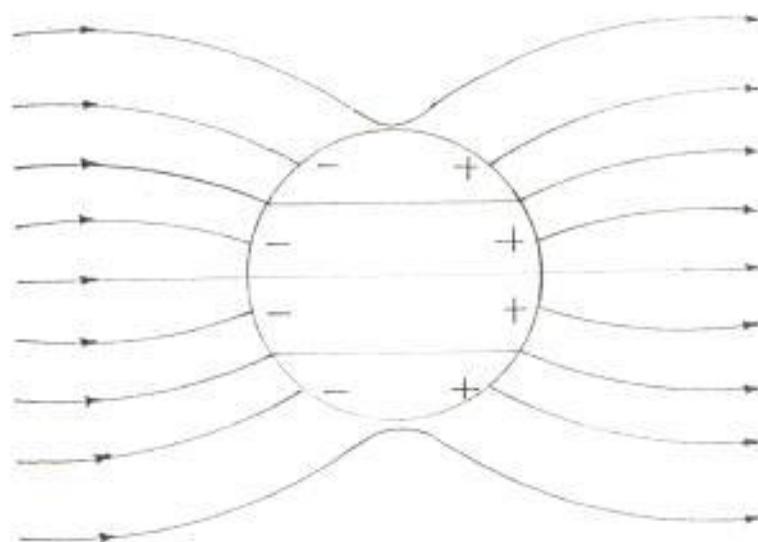
Resolviendo las ecuaciones (1.14) y (1.17), tenemos:

$$\varphi(r, \theta) = \begin{cases} -E_g r \cos \theta + \frac{\epsilon_i - \epsilon_g}{\epsilon_i + 2\epsilon_g} a^3 E_0 r^{-2} \cos \theta & r > a \quad (1.18a) \\ 3E_g \frac{\epsilon_g}{\epsilon_i + 2\epsilon_g} r \cos \theta & r < a \quad (1.18b) \end{cases}$$

Y el campo eléctrico puede obtenerse en cualquier punto por deri-



a) Líneas de desplazamiento eléctrico



b) Líneas de campo eléctrico

Fig. 1.3 Campo eléctrico uniforme distorsionado por la presencia de una esfera dieléctrica

vacación. Esto es:

$$E = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (1.19)$$

Luego:

$$E = \begin{cases} E_g \cos \theta & r > a \\ \frac{3\epsilon_3}{\epsilon_1 + 2\epsilon_3} E_g & r \leq a \end{cases} \quad (1.20a)$$

$$(1.20b)$$

Y hemos obtenido de esta fórmula la relación existente entre los dos campos (8):

$$E_1 = \frac{3}{2 + \epsilon_1/\epsilon_3} E_g \quad (1.21)$$

Las líneas de desplazamiento y las líneas de fuerza se ilustran en la figura 1.3.

La potencia promedio disipada en un dieléctrico bajo la influencia de un campo eléctrico alterno, puede ser expresada por:

$$P = \frac{1}{2} R_e \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \, dv \quad (1.22)$$

$$P = \frac{1}{2} w \epsilon'' / E^2 \int_V dv \quad (1.23)$$

La potencia por unidad de volumen será:

$$P_v = \frac{1}{2} w \epsilon'' / E^2 \quad (1.24)$$

Sabemos que:

$$|E| = \sqrt{2} E_{\text{rms}} \quad (1.25)$$

reemplazando (1.25) en (1.24):

$$P_v = w \epsilon_0 \epsilon_r'' / E_{rms}^2 f^2$$
$$P_v = 2 \pi f (8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}) \epsilon_r'' / E_{rms}^2 f^2$$
$$P_v = 55.63 f / E_{rms}^2 \epsilon_r'' \times 10^{-12} \text{ w/m}^2$$
(1.26)

De esta manera observamos que la potencia absorbida por el insecto dependerá de la  $f$ , de la intensidad del campo eléctrico, y del factor de pérdida dieléctrica  $\epsilon_r''$ , que es la parte imaginaria de la permitividad compleja  $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''(B)$ .

### 1.5 Variedad de insectos a tratar

En nuestro país existe una amplia gamma de insectos que asolan a los productos almacenados en silos. Esta amplia gamma se divide en coleópteros (escarabajos, gorgojos), Lepidópteros (palomillas) y Diphthopteras (cucarachas). Algunos miembros de estas familias son:

#### Coleópteros:

*Sitophilus Oryzae* -Gorgojo del arroz-

*Tribolium Confusum* -Gorgojo de la harina de arroz-

*Gnathocerus Cornutus* -Escarabajo cornudo de los cereales-

*Orizaephilus Surinamensis* -Carcoma dentada de los granos-

*Acanthoscelidas Obtectus* -Gorgojo de las judías-

*Araecerus Fasciculatus* -Gorgojo picudo del café-

*Lasiderma Serricornis* -Carcoma del tabaco-

### **Lepidópteros:**

*Ephestia Huehmella* -polilla de la harina-

*Ephestia Cautella* -palomilla de las frutas secas-

*Ephestia Elutella* -palomilla del tabaco-

*Sitotroga Cerealella* -palomilla de los cereales-

### **Dipthiopteros:**

*Blatella Germánica* -cucaracha germánica-

*Periplaneta Americana* -cucaracha americana-

*Blatta Orientalis* -cucaracha oriental-

Generalmente el INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias) trabaja sobre plagas específicas en su laboratorio de Entomología, siendo la más común la **Sitotroga Cerealella**, que infesta un gran porcentaje de los granos almacenados como son maíz, trigo, etc. Puesto que estos productos son los más comunes en nuestro país, y ésta es la plaga que los infesta, decidí que era la más adecuada para mis pruebas de irradiación, utilizando como anfitrión granos de maíz y de arroz.

### **1.5 Resultados de otras pruebas**

Los resultados de experimentos sobre pupas de insectos, especialmente sobre el *Tenebrio Molitor*, a frecuencias de 9 y 10 Ghz, los podemos clasificar en efectos teratogénicos y efectos sobre la reproducción. Algunos de estos efectos son:

### 1.6.1 Efectos teratogénicos

1. Los efectos teratogénicos se observan con dosis tan bajas como  $8.5 \text{ mW/cm}^2$  durante dos horas (3).
2. Parece existir al menos en un cierto margen de densidades de potencia una ley de reciprocidad que establece que los efectos teratogénicos dependen de la dosis total recibida y no de como tenga lugar la radiación. Una investigación posterior -realizada por P.S. Rai sobre el *Tenebrio Molitor*- ha puesto de manifiesto que por encima de  $55 \text{ mW/cm}^2$  la ley deja de cumplirse, pues los efectos teratogénicos son más acusados cuando las mismas dosis se obtienen con nivel de potencia más elevado.
3. Experiencias a 27 MHz, 2, 4, 10 y 35 Ghz de irradiación indica que los efectos teratogénicos dependen ligeramente de la frecuencia, siendo las más bajas las que mayor poder teratogénico presentan.
4. Experiencias en espacio abierto sobre huevos, larvas y pupas de la especie *Drosophila melanogaster* a 17 y 73 Ghz, con densidades de potencia de 60 y  $100 \text{ mW/cm}^2$ , respectivamente, y con tiempos de irradiación comprendidos entre dos y tres horas, no han registrado la existencia de efectos teratogénicos.

5. Los efectos no parecen depender de si la radiación es continua o pulsada, al menos con las frecuencias de pulsos de repetición de pulsos utilizados.
6. No parece influir la alineación del eje principal del insecto respecto del campo electromagnético.
7. Las pupas más jóvenes son más sensibles a la RF; pupas de 6 días y larvas son prácticamente insensibles a los niveles de radiación empleados en las experiencias.
8. La irradiación realizada a 18 Ghz presenta las mismas características que la realizada a 9 Ghz.

Estos resultados (2, 3, 4, 5) parecen sugerir que los niveles de RF necesarios para inducir teratogénesis dependen de la especie irradiada.

### **1.6.2 Efectos sobre la reproducción**

1. Reducción de la fecundidad del *Tenebrio Molitor* a 39 Ghz. En las hembras adultas procedentes de larvas irradiadas se observa una reducción del tamaño de los ovarios, mientras que en los machos adultos una inactivación de los espermatozoides.
2. Reducción en la capacidad reproductora de las diferentes

especies irradiadas (2.4 Ghz) por Ondraček, producido por daños en los órganos sexuales externos y por perturbación del balance de agua en el organismo. En opinión de este investigador, la RF puede dañar las células sexuales, a pesar de que este fenómeno aún no ha sido observado.

3. Aumento significativo en el número de huevos de la puesta de *Drosophila melanogaster* mediante la irradiación de insectos adultos a 17 Ghz y  $60 \text{ mW/cm}^2$  durante 16 horas. 30% de incremento si el individuo irradiado de la pareja es la hembra y el 20% si es el macho. Dardalhom ha sugerido que la RF puede interferir en el metabolismo de las hormonas.
4. Elevación del potencial reproductor del *Tenebrio Molitor* cuando se irradian insectos adultos a 27 Mhz, 2.4, 10 y 35 Ghz; observándose los mismos efectos en adultos procedentes de larvas irradiadas.

Los resultados anteriores (2) pueden parecer contradictorios, pero no hay que olvidar que las experiencias están realizadas a diferentes frecuencias, y que la opinión generalizada es que tales efectos deben ser muy dependiente de la frecuencia.

## CAPITULO II

### EL CIRCUITO DE MICROONDAS

El sistema de microondas que se utilizará para nuestras pruebas experimentales constan de equipos que trabajan en la banda  $\lambda$  de microondas (3.2-12.4 GHz). En este capítulo describiremos los aspectos que se consideraron para seleccionar las formas de irradiación y evaluación de nuestro experimento; así como una descripción de los circuitos que utilizaremos y de los equipos que los conforman. Haremos una descripción general de cada uno de ellos, de la forma en que están constituidos, de las precauciones que deben tenerse al manejarlos, y de las características del equipo a utilizarse.

#### 2.1 Generalidades del experimento

Para llevar a cabo las pruebas de irradiación sobre las pupas de insectos, consideramos los siguientes aspectos:

- Por los resultados obtenidos por G.A Lindauer (4) se consideró conveniente utilizar el mismo arreglo de microondas para nuestro trabajo investigativo, empleando las cápsulas de polietileno para la colocación de las pupas.

- Del trabajo realizado por M.S. Witmey y M.Sc. Kharadly (9) apreciamos muy útil la forma de irradiación, su forma de tabular los resultados y la evaluación de los mismos en adultos normales, deformes y pupas muertas, es por esta razón que lo consideraremos en nuestra forma de expresar los resultados.
- Tomando en cuenta el equipo de microondas existente en el laboratorio de radiofrecuencia (banda X) las pruebas de irradiación debían de ser hechas utilizando una frecuencia de 9GHz y potencias de 8 y 15 mW.
- Puesto que el INIA<sup>1</sup> tan solo nos podía proporcionar huevecillos de Sitotroga Cerealella, se consideró que los experimentos debían realizarse con este tipo de insecto.

Basándonos en lo expresado anteriormente las pruebas de irradiación las realizaremos de dos formas:

- a) **En ensamblaje:** Esto es, utilizando el circuito de la figura 2.1 y colocando las pupas y los anfitrión-pupas (grano que contiene pupas en su parte interna) en el interior de la guía, tal como lo muestra la figura 2.2.
- b) **En espacio libre:** Utilizando como base el mismo circuito que para irradiación en ensamblaje, con la diferencia de que en lugar de la terminación empleamos una antena tipo bocina (Horn) y además un observador de energía (figura 2.4).

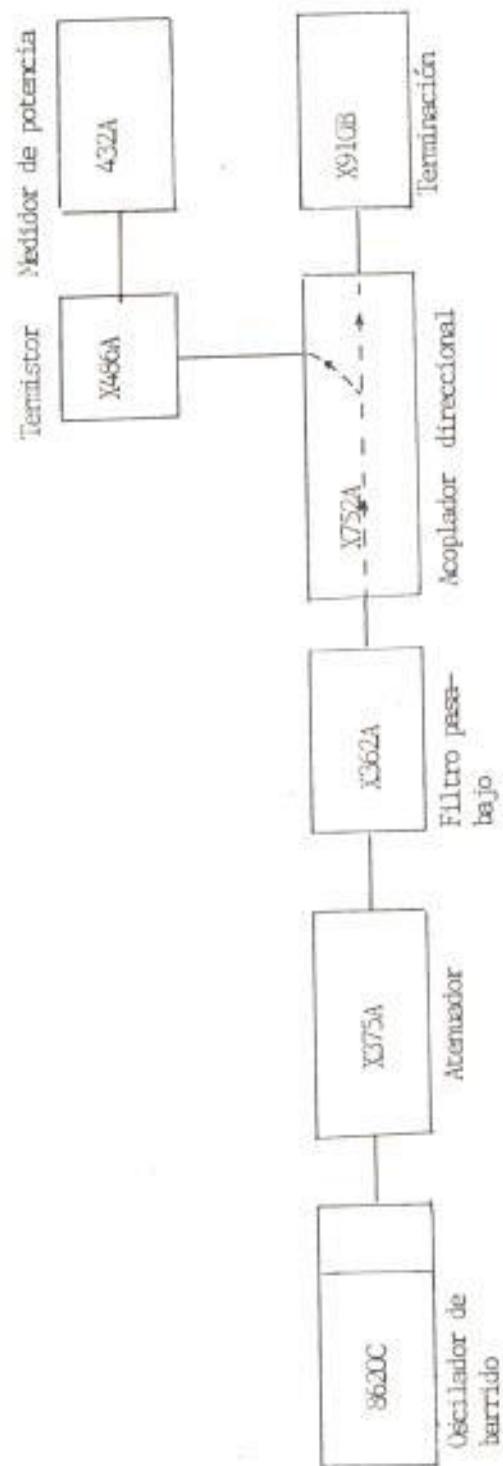
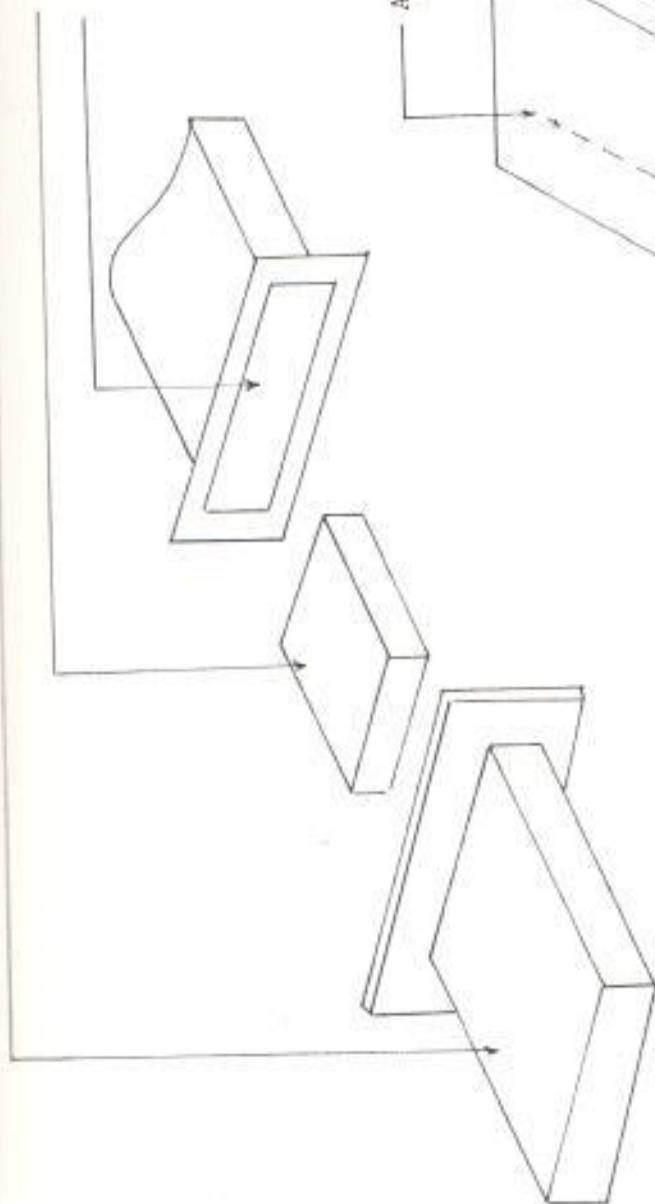


Fig. 2.1. Circuito de Microondas para irradiación de pupas en guía de onda

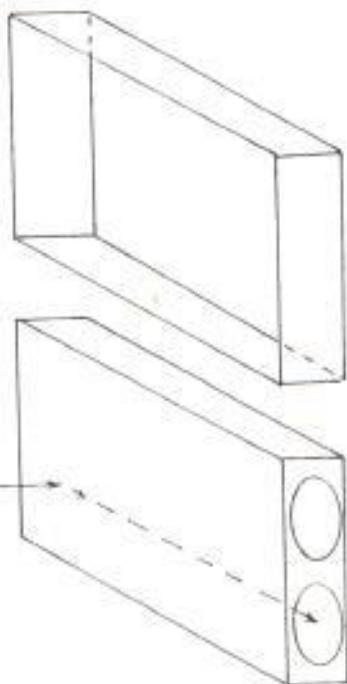
Acoplador direccional

Cápsula de polietileno

Terminación



Agujero para alojar las pupas



a) Para pupas solas

b) Para anfitrión-pupas

Fig. 2.2 Ubicación de las cápsulas de polietileno en el circuito de microondas

Fig. 2.3 Cápsulas de polietileno

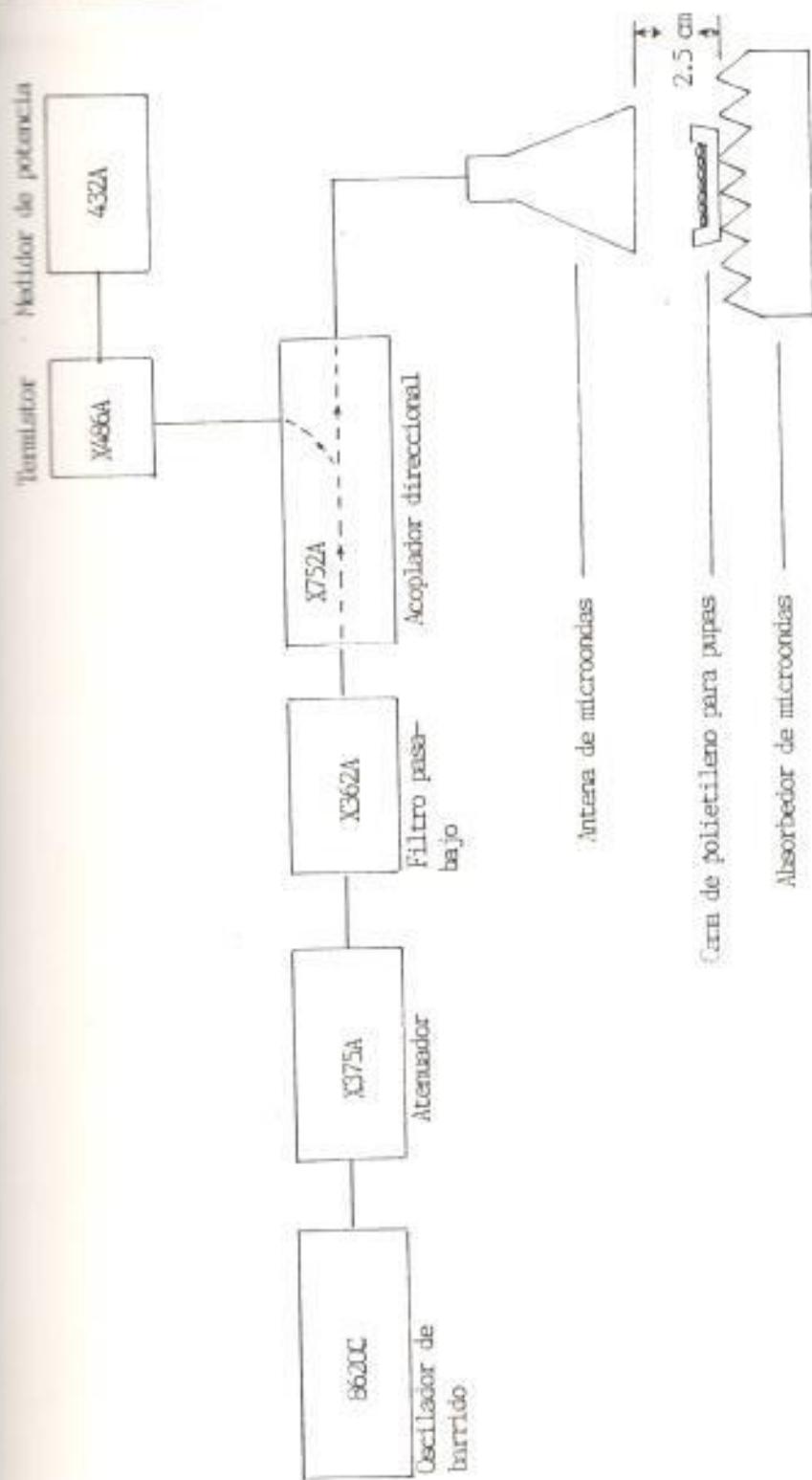


Fig. 2.4 Circuito de microondas para irradiación a espacio libre

## 2.2 Diagrama de bloques del circuito

A continuación describiremos cada uno de los diagramas de bloques que se utilizarán para nuestras pruebas. Esta descripción la haremos en forma muy general, indicando tan solo la función que cada bloque cumplirá en el diagrama.

### 2.2.1 Irradiación en ensamblaje

En la figura 2.1 tenemos un oscilador de barrido que nos proporcionará la señal de microondas. Mediante un cable coaxial lo conectamos a un adaptador, el mismo que nos permite llevar la señal desde un sistema coaxial a un sistema de guía de onda. De allí la señal pasa por un atenuador, el mismo que servirá para variar la potencia de la señal de microondas aplicada a las pupas. El filtro pasa-bajo eliminará los armónicos producidos por el oscilador. La señal llega después al acoplador direccional, en donde una muestra de la misma va al medidor de potencia a través del termostor; y la otra se aplica a las pupas. Finalmente la señal llega a la terminación en donde será absorbida por la carga de la misma.

La relación entre la potencia que llega a las pupas ( $P_p$ ) y la potencia leída en el medidor de potencia ( $P_m$ ) será:

$$P_m = 1/10 P_p \quad (2.1)$$

debido a que el acoplador direccional tiene un factor de acoplamiento de 10 db.

En la figura 2.2 observamos que entre el acoplador direccional y la terminación hay una cápsula de polietileno, la misma que será de la forma de las figuras 2.3(a) ó (b), dependiendo de si en su interior colocó las pupas solas, o los granos infestados con pupas. Se utiliza el polietileno porque es un dieléctrico y toda la señal de microondas lo atraviesa.

### 2.2.2 Irradiación a espacio libre

Para este tipo de irradiación, el circuito es básicamente el mismo que se usó para las pruebas en ensamblaje, con la diferencia de que al final del circuito de microondas utilizamos una antena tipo bocina en lugar de la terminación.

A una distancia de 2.5 cm colocaremos una cama de polietileno, en cuyo lecho estarán los objetos de muestras pruebas. La cama de polietileno estará descansando sobre un absorbedor de microondas, para de esta forma evitar que la radiación se propague por el espacio libre.

## 2.3 Descripción de los equipos y elementos

En esta sección del capítulo II describiremos, en una forma detallada, cada uno de los equipos y elementos a utilizarse, menciona-

remos sus características generales, las precauciones que se debe tener al manejarlos y las características específicas del modelo a usar.

### 2.3.1 Oscilador de barrido

Las mediciones de una sola frecuencia realizadas para varios puntos, no son satisfactorias cuando hacemos mediciones en equipos que trabajan en un rango de frecuencia, porque no todas las frecuencias son cubiertas. Sin embargo, los osciladores de voltaje controlados son capaces de proveer un barrido de frecuencia.

Los requerimientos básicos de tales osciladores incluyen: ancho de barrido variable, velocidad de barrido, capacidad de modulación, estabilidad y receptabilidad de la señal.

El equipo a emplearse está diseñado para usarlo en sistemas analizadores de redes, con la idea de tener un sistema completo de mediciones de microondas. También puede utilizárselo en otros sistemas para proveer una señal de barrido. Este tipo de oscilador tiene varios modos de operación, los mismos que vamos a analizar.

**Modo de barrido completo (Full Sweep):** Que es seleccionado automáticamente al prender el equipo. En este modo tres marcas son necesarias. La una marca es ajustada por el control

CW, cuando el modo de barrido de frecuencia  $\Delta F$  es seleccionado la marca CW debe ser puesta en el centro de la frecuencia del barrido  $\Delta F$ . Las otras dos marcas son ajustadas por los controles de inicio de marca (start marker) y parada de marca (stop marker) los mismos que nos darán la frecuencia de inicio/final del barrido, cuando el modo de barrido de marca (marker sweep) es seleccionado. Estas dos marcas son aprovechadas en el modo de barrido  $\Delta F$  ( $\Delta F$  sweep).

**Modo barrido de marca (marker sweep):** Cuando el modo barrido de marca es seleccionado, se utiliza la marca controlada por el CW y su posición identifica el centro de la frecuencia del barrido  $\Delta F$ . Las marcas de inicio/final del barrido de frecuencia son determinadas por la posición de las marcas de inicio y parada.

**Modo de barrido  $\Delta F$  ( $\Delta F$  sweep):** Cuando el modo de barrido  $\Delta F$  es seleccionado, también lo es el modo CW, y el centro de la frecuencia es ajustado por el control CW. El control  $\Delta F$  selecciona la desviación de la frecuencia CW. Las marcas de inicio y parada son necesarias en el barrido  $\Delta F$  y son utilizadas las frecuencias de inicio y parada de la marca de barrido.

**Modo CW:** Cuando este modo es utilizado la señal RF de salida es de una sola frecuencia, la misma que es seleccionada ajustando el control CW. Presionando el control CW VERNIER se obtiene una frecuencia más precisa.

El oscilador de barrido a utilizarse es el modelo 8620C y lo podemos observar en la figura B.1

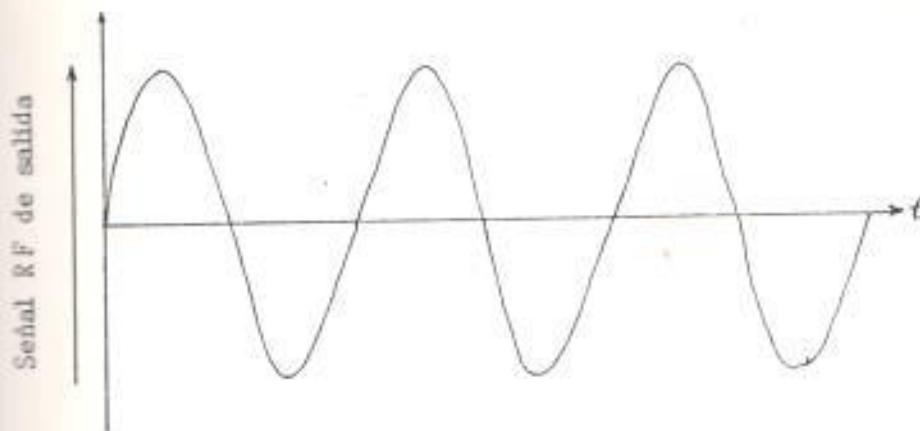
#### **Especificaciones del Oscilador de Barrido utilizado:**

Productor:	Hewlett Packard modelo 8620C
Rango de frecuencia:	determinado por la banda seleccionada y por el módulo RF instalado.
Funciones de barrido:	barrido completo, barrido de marca, barrido $\Delta F$ , operación CW y CW variable.
Potencia:	100, 120, 220 y 240 Vac $\pm$ 5% - 10%; 50 - 400 MHz aproximadamente 140 watts.
Dimensiones:	425 mm X 1326 mm X 33,7 mm (L x A x H).
Peso:	24 lbs.

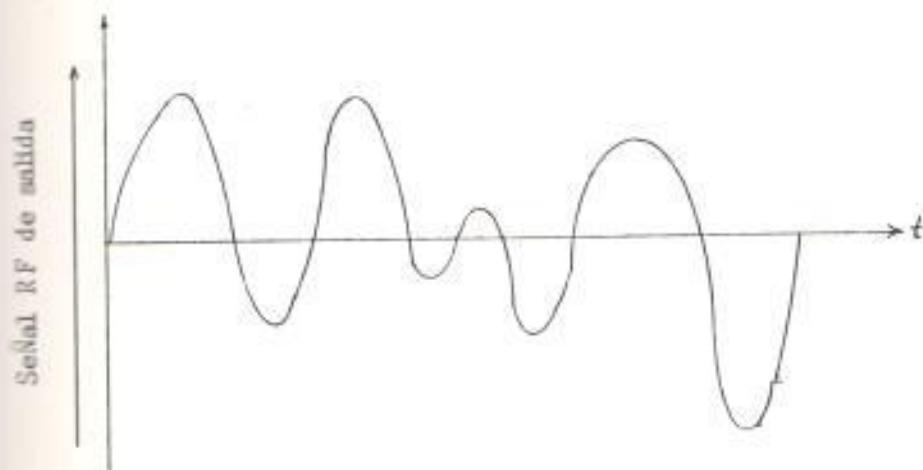
#### **Módulo RF 86250A**

Este módulo (fig.B.1) está diseñado para usárselo con el oscilador de barrido. Consiste de un oscilador fundamental en el rango de 8 a 12 GHz y la circuitería necesaria para ser sintonizado. Puede ser programado remotamente a través del panel posterior del 8620A.

La salida RF del modelo 86250A es controlada en el panel



a) Señal nivelada



b) Señal no nivelada

Fig. 2.5 Forma de la señal RF de salida v.s. tiempo

en panel frontal a través del control nivel de potencia. La potencia puede ser nivelada externa o internamente usando a través de la banda una potencia convencional de muestreo y una realimentación. El switch de nivel automático de control (ALC) selecciona el modo de nivelación interno (int), u (off). El conector de entrada del panel frontal ALC y el control de ganancia es usado para formar el lazo externo de nivelación. Cuando la señal externa no está nivelada, el led no nivelado se enciende indicando que la señal RF no es uniforme a través de la banda (fig 2.9). Los conectores en la parte posterior son para señales externas FM y para la salida del voltaje de referencia del barrido.

#### **Especificaciones del módulo RF utilizado:**

Productor: Hewlett Packard modelo 86250A

Rango de frecuencia: 8.0-12.4 GHz

Exactitud de Frecuencia: (a 25°C el switch FM en posición 1 ó 2)

modo CW:  $\pm 40$  MHz

todos los modos de barrido (tiempo de barrido 0.1 seg):  $\pm 50$  MHz.

Estabilidad de frecuencia: temperatura:  $\pm 1.2$  MHz/°C

cambio de voltaje de línea en 10%:  $\pm 40$  MHz

	cambio de nivel de potencia en 10 db: $\pm$ 2 MHz
Nivel de potencia:	(para rango de frecuencia calibrado en 25 <sup>0</sup> C).
	Máxima potencia uniforme: 4.0 dbm (2.5 mW)
Peso neto:	4 Lbs. 6 onz
Dimensiones:	304.8 mm x 147.6 mm x 127 mm.

### 2.3.2 Adaptador

El adaptador Hewlett Packard modelo 281 provee un conveniente medio de acoplamiento entre guía coaxial y guía rectangular. La potencia puede ser transmitida en otra dirección y cada adaptador cubre el rango de frecuencia completo de su banda. Está diseñado para asegurar una mínima fuga en su extremo rectangular. Una prueba transforma la impedancia de la guía de onda a la de 50 ohm de la línea coaxial.

#### Precauciones:

- a) **Protección de flancos:** Los flancos deben ser protegidos de cualquier daño que pueda originar un mal contacto en los extremos de la guía. Cualquier basura, rugosidad de la cara del adaptador, incrementa la fuga y el coeficiente de reflexión de la unión. El protector plástico debe usarse cuan-

do el adaptador no está siendo utilizado.

b) **Ensamblaje cuidadoso:** Cuando se conecte el adaptador a la guía de onda debe observarse que:

- Las puertas rectangulares estén orientadas de la misma forma (no cruzadas).
- Las puertas estén alineadas para evitar reflexiones.
- Los flancos estén sujetos con los tornillos, de tal forma que la presión sea eventualmente distribuida sobre los contactos. Uniones flojas y flancos distorcionados resultan en fuga y mal acoplamiento.

#### **Características del adaptador utilizado.**

Productor:	Hewlett Packard modelo X281A
Rango de frecuencia:	8.2-12.4 GHz
Conecto coaxial:	Hembra tipo-N
Longitud:	37 mm
Peso:	1/4
Coeficiente de reflexión máxima:	0.11 (1.25 SWR).

#### **2.3.3 Atenuador**

El atenuador de microondas es un dispositivo que produce atenuación de la onda propagada a través de él. Los atenuadores de microondas son usados para ajustar el nivel de potencia aplicado o para propósitos de aislamiento entre

la fuente de microondas y la carga. Cuando el atenuador es usado para aislamiento, se lo llama **atenuador buffer**. Hay dos tipos de atenuadores usados en microondas: el atenuador coaxial y el atenuador de guía de onda. Los atenuadores coaxiales pueden dividirse en dos categorías.

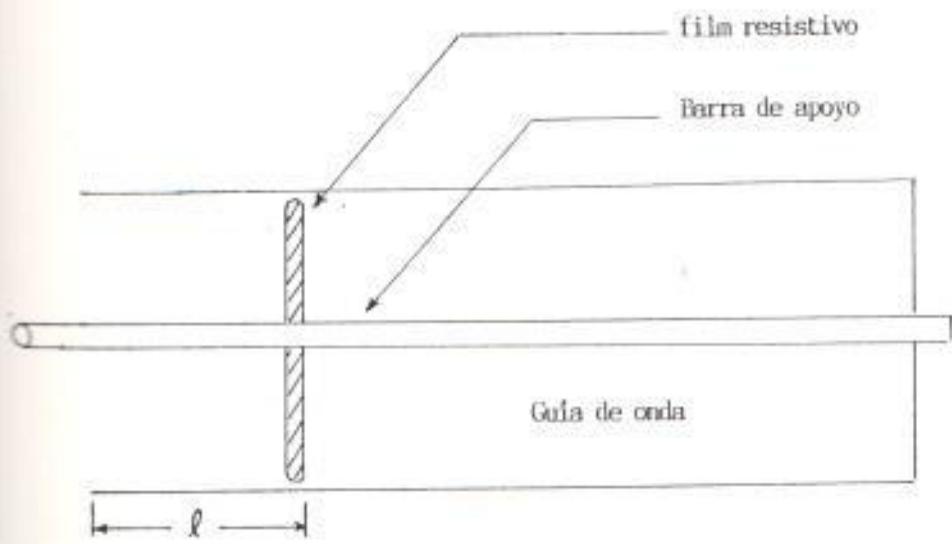
Uno es el atenuador de resistencia de film, el otro el atenuador de corte, puesto que nuestro trabajo de investigación se realizará en guías de onda, no hablaremos de éstos.

Al igual que hay dos tipos de atenuadores coaxiales, hay dos tipos de atenuadores de guía de ondas; uno es el atenuador de desplazamiento transversal de film resistivo y el otro es el atenuador de aleta de film resistivo ilustrados en la figura 2.6. En ambos casos, si la intensidad del campo eléctrico en la superficie del film resistor es  $E$ , que es igual a 2 veces el valor RMS del campo eléctrico  $E_{eff}$ , y  $R$  es la resistencia superficial por unidad de área del film, el voltaje a través de la unidad de área del film es  $E_{eff}$  voltios y el flujo de corriente por unidad de área es  $E_{eff}/R$  amp. Por lo tanto, la potencia absorbida por el film resistivo, por unidad de área será:

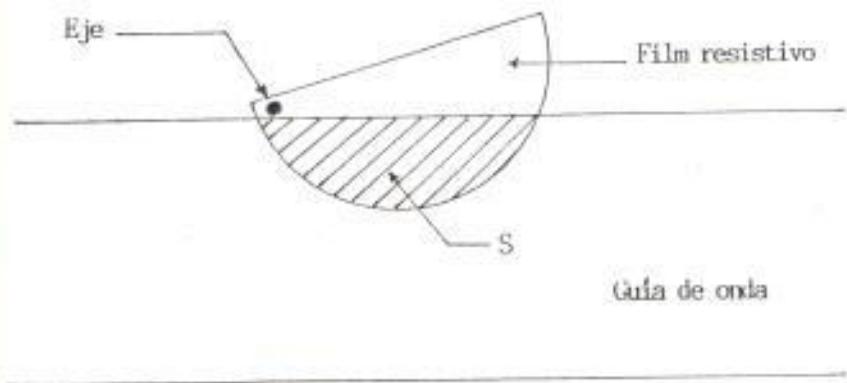
$$P_w = E_{eff} \cdot E_{eff}/R = E^2/2R \quad (2.2)$$

Para el modo TE<sub>10</sub> de una guía rectangular, la intensidad del campo eléctrico en el interior de la guía es de la forma:

$$E = E_0 \sin \frac{\pi x}{a} \quad (2.3)$$



a) Atenuador de desplazamiento transversal



b) Atenuador aleta

Fig. 2.6 Atenuadores variables de guía de onda

donde:

a: ancho de la guía de onda

$E_0$ : amplitud del campo eléctrico en el interior.

Por lo tanto, para el atenuador del film resistivo de desplazamiento transversal, tenemos que cuando  $x = a/2$  la atenuación es mínima.

Para el atenuador aleta, la potencia absorbida por el film resistivo es proporcional al área del film resistivo expuesto al campo RF. Por lo tanto,

$$P_a = \int_S P_w ds = \int_S (E^2/2R) ds \quad (2.4)$$

donde S es el área del film resistivo insertado en el interior de la guía de onda.

#### **Atenuador variable modelo 375A**

Los modelos 375A permiten ajustar el nivel de potencia de un sistema de guía de onda o proveer aislamiento entre la fuente y la carga. Cubren un rango de frecuencia de 2.6 a 40 GHz (bandas-banda R). La atenuación es continuamente variable desde 0 a 20 db.

Consisten de una sección ranurada en la cual un film resis-

tivo es insertado en el centro de la gufa de onda. La atenuación es lograda variando la profundidad de penetración del material resistivo.

#### **Especificaciones del atenuador variable utilizado**

Productor:	Hewlett Packard modelo X375A
Rango de frecuencia:	8.2-12 Ghz
Potencia promedio disipada:	2 Watts
Máximo SWR:	1.15
Precisión:	0 a 10 db; $\pm$ 1% 10 a 20 db; $\pm$ 2%
Peso:	2 lb
Longitud:	130 mm

#### **2.3.4 Filtro Pasa-bajo**

Varios tipos de filtros pasa-bajo son mostrados esquemáticamente en la figura 2.7. El conjunto de capacitancias son formadas por ventanas capacitivas o espirales capacitivas. Estas capacitancias eliminan las ondas de alta frecuencia y solo dejan pasar las de baja frecuencia. El circuito equivalente puede ser considerado como se muestra en la figura 2.7(d).

En el filtro pasa-bajo necesariamente tenemos que hablar de dos tipos de bandas: banda de paso (Pass Band) y banda

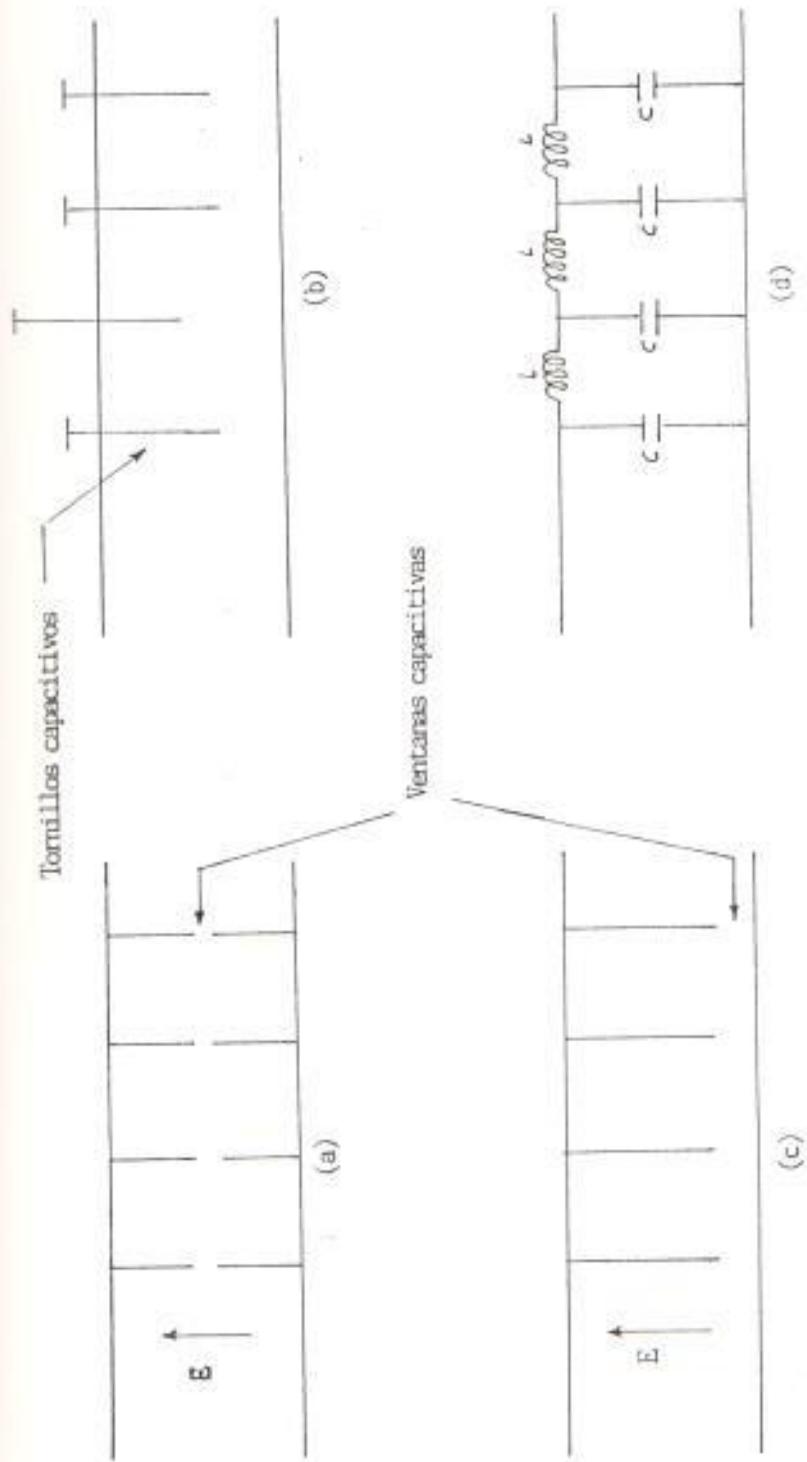


Fig. 2.7 Filtros pasa-bajo y circuito equivalente

de bloqueo (Stop Band), cuando consideramos todas las señales en frecuencias desde cero a infinito (figura 2.8).

### **Filtro pasa-bajo modelo 362A**

El filtro pasa-bajo modelo 362A tiene un amplio rango de bandas, diseñado para suprimir la segunda y tercer armónica de frecuencias pasa-banda. Independiente del modo de propagación, las armónicas son atenuadas por lo menos 40 db en la banda de bloqueo (35 db para la banda R). El filtro es valioso cuando la transmisión en una sola frecuencia es importante, tal es el caso de las mediciones SWR (relación de onda estacionaria) o bien en recepciones y mediciones de respuestas de filtros.

El modelo 362A consiste de una sección corta de guía de onda, cuya parte central ha sido modificada. Las dimensiones y espaciamientos de las ranuras en la parte central de la guía son tales que todas las frecuencias en la banda de bloqueo son atenuadas independientemente del modo de propagación. El paso de transición ha sido calculado de tal forma que el filtro presente un buen acoplamiento a la banda de paso.

#### **Precauciones:**

- a) No usar el filtro con frecuencias fuera de la banda especificada.

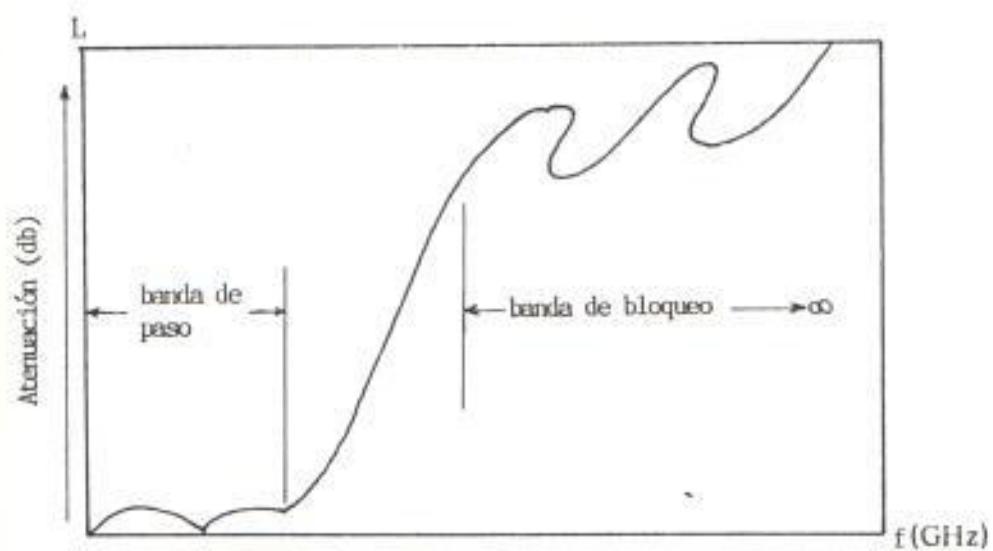


Fig. 2.8 Banda de paso y banda de bloqueo

- b) Mantenga el filtro limpio. Cualquier basura o polvo en el interior del filtro empeorará grandemente el funcionamiento del mismo.
- c) Mantenga cubiertos los flancos del filtro cuando no lo esté usando, para mantener el polvo afuera y proteger las superficies. Cualquier daño en la superficie de acoplamiento causará una discontinuidad que incrementará el SWR.
- d) No limpie el filtro soplando en su interior; no es práctico.

**Especificaciones del filtro pasa-bajo utilizado:**

Productor:	Hewlett Packard modelo X362A
Banda de paso:	8.2-12.4 GHz
Banda de bloqueo:	16-37.5 GHz
SWR:	1.5 (banda de paso)
Mínimo rechazo:	40 db (banda de bloqueo)
Peso:	13 onz.
Longitud:	136 mm.

**2.3.5 Acoplador direccional**

El acoplador direccional es una guía de cuatro puertas, como muestra la figura 2.9. Consiste de la línea primaria 1-2 y de la línea secundaria 3-4.

Cuando la potencia es alimentada por la puerta 1 hay una salida por la puerta 2 en la línea primaria. La potencia

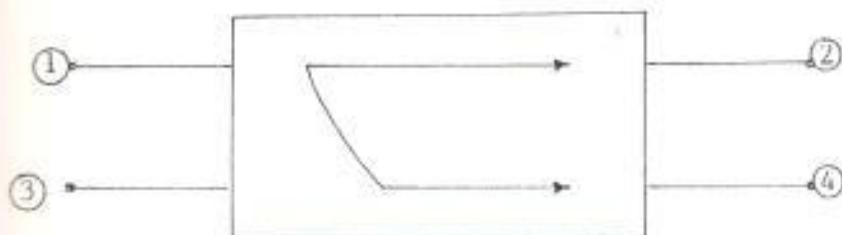


Fig. 2.9 Concepto general del acoplador direccional

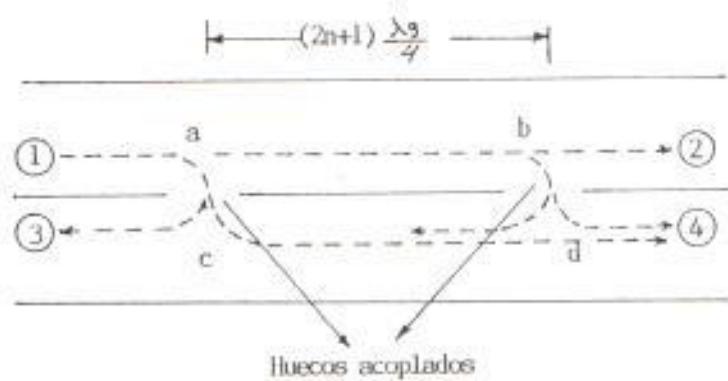


Fig. 2.10 Acoplador direccional de dos huecos

también es acoplada en la línea secundaria, y la gran porción de esta potencia acoplada fluye a la puerta 4. Si la potencia es alimentada en la dirección reversa de la línea primaria, esto es, de la puerta 2 a la puerta 1, la mayor parte de la potencia acoplada aparecerá en la puerta 3. Las características del acoplador direccional puede ser expresado en términos de los siguientes parámetros, asumiendo propagación desde la puerta 1 a la puerta 2 en la línea primaria:

$$\text{-Factor de acoplamiento} = 10 \log \frac{P_1}{P_4} \text{ (db)} \quad (2.5.a)$$

$$\text{-directividad} = 10 \log \frac{P_4}{P_3} \text{ (db)} \quad (2.5.b)$$

donde:

P1: potencia de entrada a la puerta 1

P4: potencia de salida de la puerta 4

P3: potencia de salida de la puerta 3

#### Acoplador direccional de dos huecos

Como se muestra en la figura 2.10 dos guías de onda son acopladas por dos huecos separados una distancia  $(2n+1)\lambda_g/4$  (n es un entero). La longitud del camino a-b-d es igual a la del camino a-c-d. Por lo tanto, dos ondas son transmitidas a la puerta 4.

La longitud del camino a-c y la del camino a-b-d-c tienen una diferencia de  $2 \times (2n+1)\lambda_g/4 = (2n+1)\lambda_g/2$ . Por lo tanto, las dos ondas que recorren los caminos mencionados anteriormente, se cancelarán al dirigirse a la puerta 3.

### **Acoplador direccional multihuecos**

El acoplador direccional de dos huecos puede ser superpuesto como se muestra en la figura 2.11. En lugar de dos huecos del mismo tamaño, se coloca uno mayor en el centro y dos huecos pequeños en los extremos, como lo muestra la figura, para incrementar la directividad y el ancho de banda de la frecuencia.

El acoplador de 3-huecos puede ser superpuesto, y obtenerse el acoplador de 4-huecos como lo ilustra la figura 2.11. El número en el círculo indica el tamaño relativo del hueco.

### **Acoplador direccional modelo 752**

Las características que posee el acoplador direccional multihuecos modelo 752, lo constituyen en una herramienta importante en sistemas de mediciones en guías de onda. Tiene la propiedad de inducir en una guía auxiliar un flujo de potencia esencialmente en una dirección, el cual es proporcional al flujo de potencia de la guía principal.

Por su alta directividad, los de la serie 752 pueden ser usados en mediciones de coeficientes de reflexión o SWR. El relativo acoplamiento constante a través de la banda de la guía de onda y la estabilidad del acoplamiento con el tiempo, hacen que el 752 sea útil también como atenuador

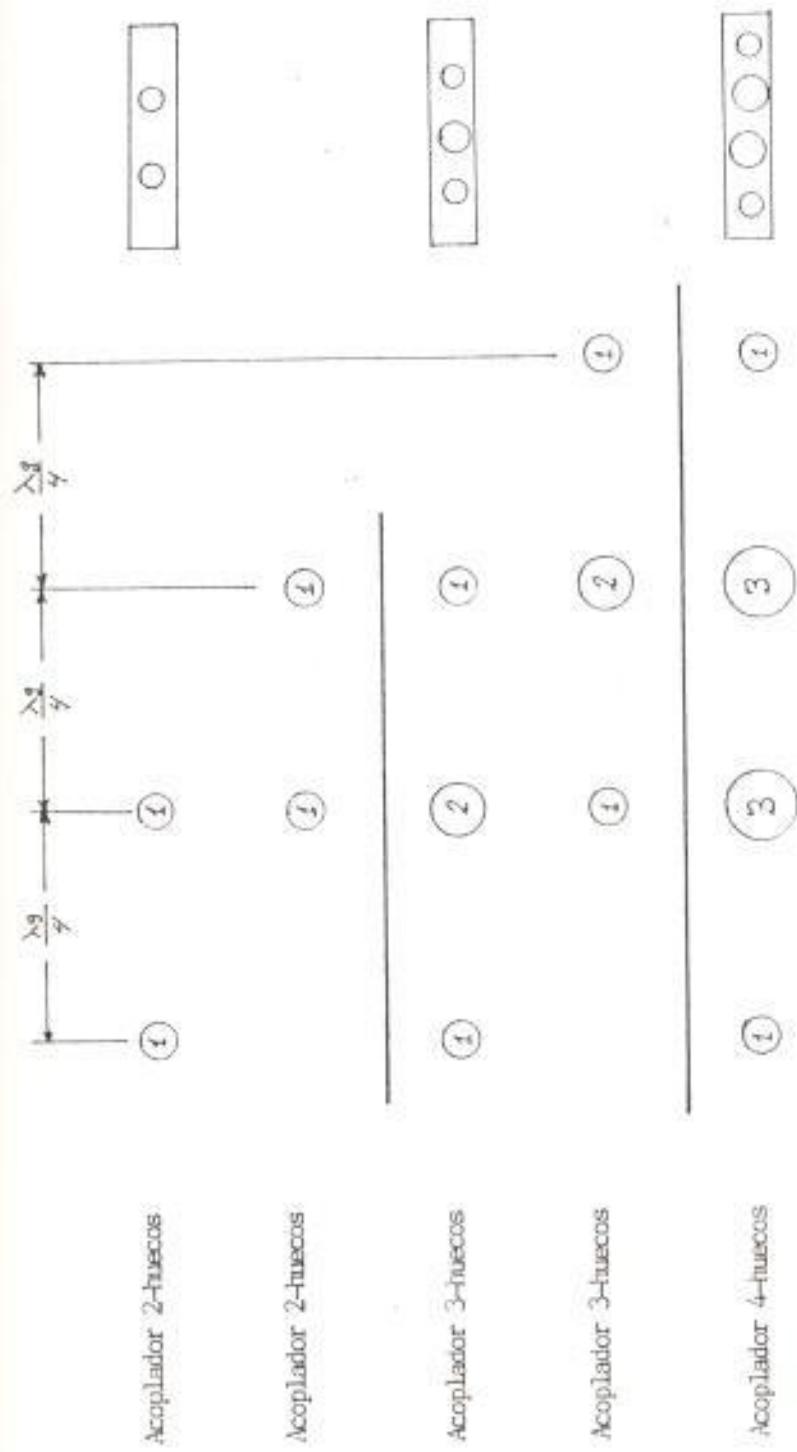


Fig. 2.11 Principio del acoplador direccional n-huecos

para aplicaciones de monitores de potencia.

Este modelo consiste de dos secciones de guías de onda, la guía principal y la guía auxiliar unidas a lo largo de sus superficies anchas. El final de la guía auxiliar es una terminación acoplada, y la otra terminación es una puerta simple. Un arreglo de huecos en las superficies en común, permite la transferencia de potencia de una guía a otra.

La cantidad de potencia que está en la guía auxiliar, depende del factor de acoplamiento. En este modelo, la potencia acoplada en la guía auxiliar puede ser de 50(3db), 10(10db) ó 1(20db)% de la potencia que está en la guía principal.

#### **Precauciones:**

- a) Protección de flancos: Es necesario proteger las superficies de acoplamiento de posibles daños. Superficies irregulares causan discontinuidad e incrementan el SWR. Las tapas de plástico deben ser usadas para proteger los flancos cuando el acoplador no esté siendo utilizado.
  
- b) Evitar choques mecánico: los choques mecánicos perpendiculares al eje del acoplador pueden romper la terminación en punta de la guía auxiliar.

## Características del acoplador direccional utilizado

Productor:	Hewlett Packard modelo X752A
Rango de frecuencia:	8.2-12.4 GHz
Variación de acoplamiento:	$\pm 0.5$ db
Directividad:	40 db
Acoplamiento:	10 db
Potencia promedio de la carga auxiliar:	1 W
Peso:	1 3/4 lb
Longitud:	399 cm

### 2.3.6. Elemento detector

El elemento detector de potencia que usaremos, será el termistor. Básicamente a los termistores se los puede dividir en dos grandes grupos: Termistores de coeficientes de temperatura negativo(CTN) y coeficientes de temperatura positivo(CTP).

Según su aspecto físico se los ha clasificado en termistores de cabeza, de disco y termistores de varilla. El tipo de termistor que usaremos es un CTN de cabeza.

El termistor CTN es un elemento resistivo, sensible a la temperatura cuya resistencia decrece cuando aumenta la temperatura. Es un elemento semiconductor y tiene un coefi-

ciente de temperatura alto; típicamente es  $-4\%$  por  $^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ . Como otros elementos semiconductores el termistor es un componente confiable, y tiene gran estabilidad.

Los termistores de cabeza están básicamente formados por una cabeza pequeña, de material semiconductor, con alambres de platino para la conexión. La mayoría de estos termistores están completamente sellados en vidrio; cada sello da al termistor una protección mecánica y le previene completamente de la humedad, de daños químicos o gases (figura 2.12). Suelen ser usados para medidas de precisión en temperatura, termometría médica, control de temperatura anemometría y medición de potencia en microondas.

Por otra parte, las características resistencia-temperatura y resistencia-potencia, de un típico termistor CTN, las podemos observar en las figuras 2.13 y 2.14, respectivamente.

#### **Termistor de cabeza modelo 486A**

Este tipo de termistor permite realizar mediciones de potencia con extrema exactitud. Todos los factores que contribuyen a mediciones ambiguas son considerados en un factor de calibración y eficiencia efectiva; datos que son suministrados para cada tipo de termistor.

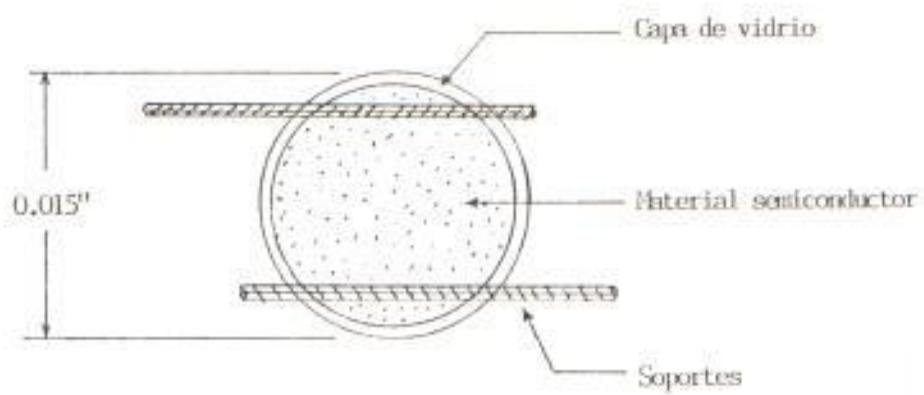


Fig. 2.12 Termistor de cabeza

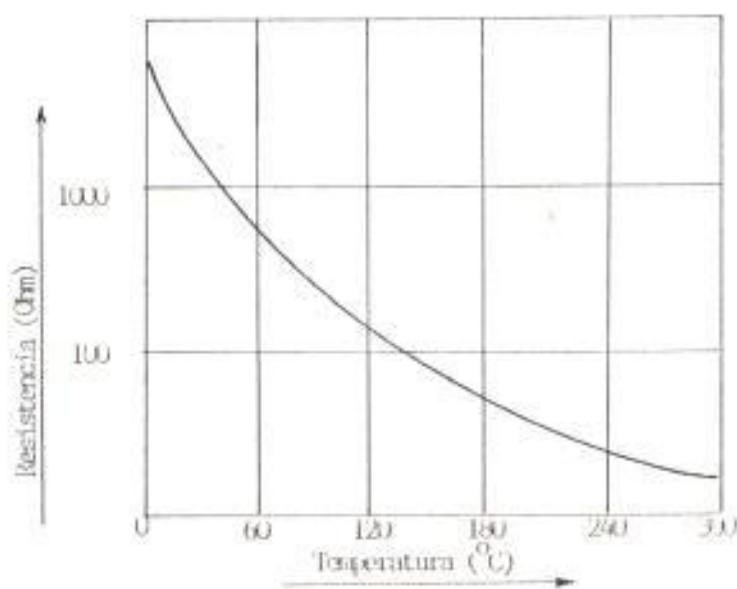


Fig. 2.13 Característica resistencia-temperatura de un termistor CTN

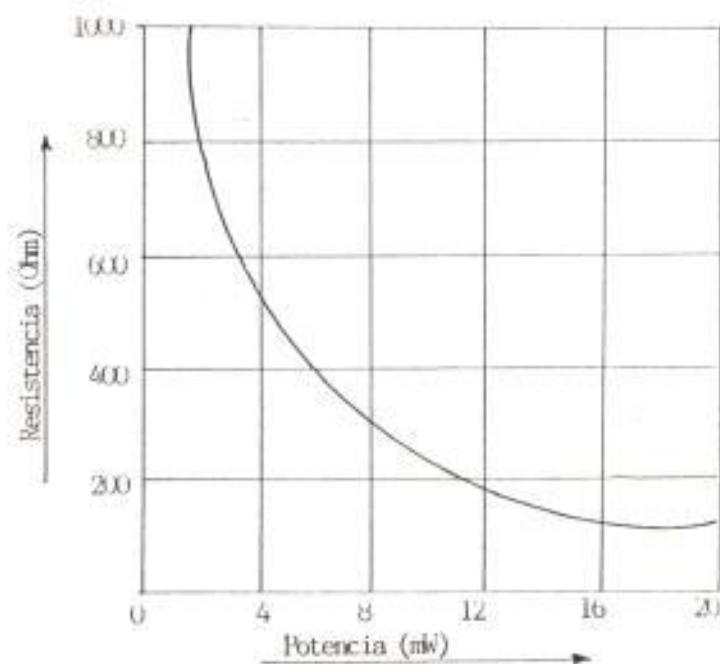


Fig. 2.14 Característica resistencia-potencia de un termistor CTN

## Especificaciones del termistor utilizado

Productor:	Hewlett Packard modelo X486A
Rango de frecuencia:	8.2-12.4 GHz
Máximo SWR:	1.5
Resistencia de operación:	100 ohm
Máxima potencia pico:	15 mW
Factor de calibración:	98%
Eficiencia efectiva:	96%
Peso:	1 lb.

### 2.3.7 Medidor de potencia

Para medir la potencia de radiofrecuencia, la señal a medirse es aplicada a un material resistivo pequeño y es disipada como calor.

El cambio de resistencia causado por el incremento de temperatura es medido por un puente sensible a este cambio y calibrado en términos de potencia. Para medidas precisas toda la potencia aplicada debe ser perfectamente absorbida por el material resistivo. Este elemento detector de potencia será el termistor.

La figura 2.15 muestra un circuito esquemático que sirve para visualizar el funcionamiento del medidor de potencia con termistor, en donde se aprecia que el elemento sensible

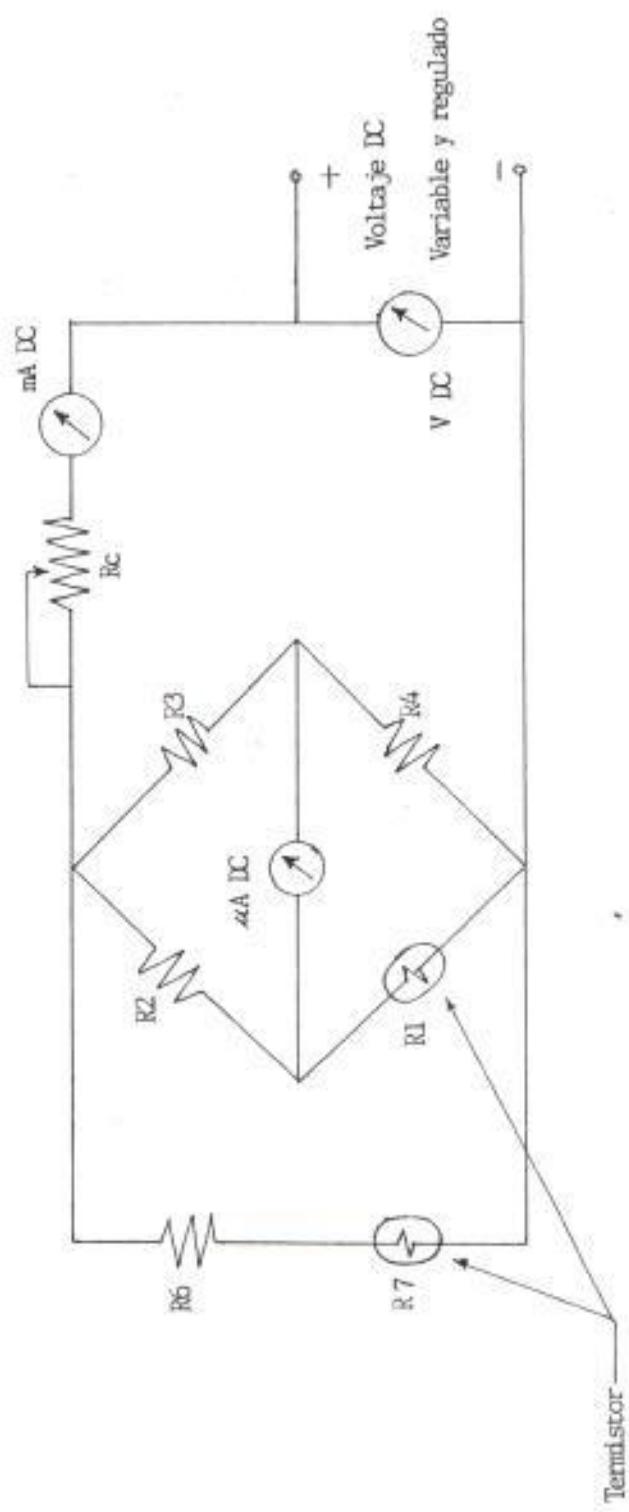


Fig. 2.15 Medidor de potencia tipo balance automático

es parte de un puente de Wheatstone.

El puente es balanceado ajustando la resistencia de calibración  $R_c$ , que varía la potencia DC aplicada al puente y por lo tanto la resistencia del termistor. Este trabajo se realiza antes de aplicar la potencia a ser medida.

Al aplicar el medidor a la fuente de potencia a ser medida, el incremento de temperatura produce un cambio en la resistencia del termistor y el puente se desbalancea. Por lo tanto, para determinar la potencia se puede cambiar la potencia DC hasta balancear nuevamente el puente, y calcular el incremento de potencia DC como el incremento de corriente del galvanómetro en una lectura de potencia RF equivalente.

Puesto que el termistor es un elemento sensible con la temperatura se provee una forma de compensación de temperatura para disminuir el error. Un método muy común es usar el compensador  $R_6$ - $R_7$ .  $R_7$  es idéntico a  $R_1$  y sujeto a la misma temperatura ambiente. Si la temperatura de  $R_1$  cambia también lo hace en  $R_7$ .

Si se desea medir potencias mayores que el máximo permitido por el instrumento, se usa un atenuador para reducir el nivel de potencia o en su caso un medidor de potencia calorímetro, que generalmente tiene un rango mayor de

medición.

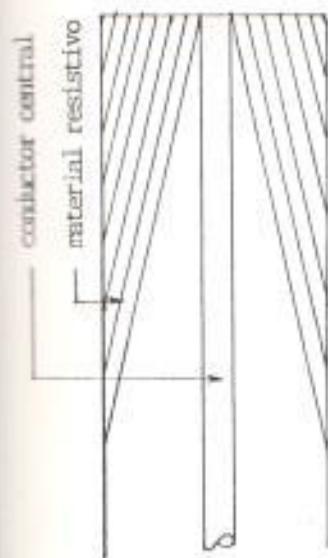
### Especificaciones del medidor de potencia utilizado

Productor:	Hewlett Packard modelo 432A
Rango de potencia:	10, 30, 100, 300 watts 1, 3, 10 mw
Calibración(en dBm):	-20 dBm a +10 dBm (0 <sup>o</sup> a 55 <sup>o</sup> C) $\pm$ 1% de la escala en todos los rangos.
Bolómetro:	Termistor
Peso:	6 1/2 lbs.

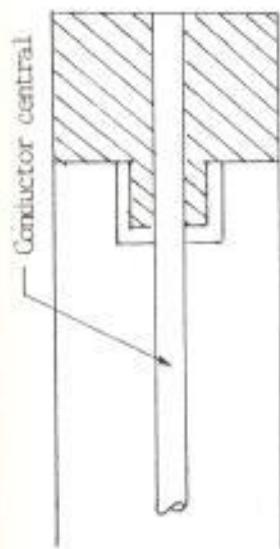
### 2.3.8 Terminación

La terminación de microondas es un dispositivo usado para terminar una transmisión sin mucha reflexión. Funciona como un absorbedor de microondas. Hay dos tipos de terminación: una es la terminación coaxial y la otra es la terminación de guía de onda. Los dos tipos de terminación son mostrados en las figuras 2.16 y 2.17

Analizando las terminaciones de guía de onda tendremos que la terminación acabada en punta consiste de un film resistivo para aplicaciones de baja potencia, y de material

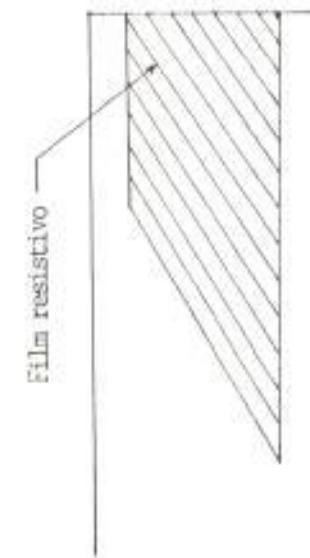


a) Terminación en punta

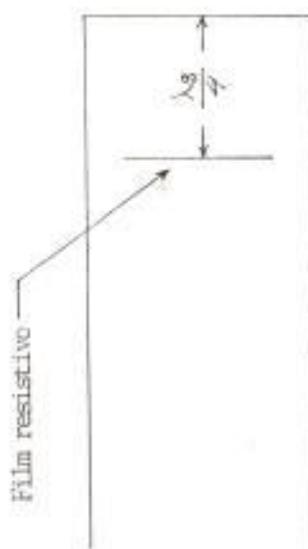


b) Terminación escalonada

Fig. 2.16 Terminaciones coaxiales



a) Terminación en punta



b) Terminación de film resistivo de  $\lambda_g/4$  de onda

Fig. 2.17 Terminaciones de guía de onda

resistivo, tal como poli-hierro (poly-iron) o una carga acuática (water load) para aplicaciones de alta potencia. La potencia en su mayor parte es una pérdida óhmica, y la misma es convertida en calentamiento jouleano. El resto de la potencia es perdida en el dieléctrico de la estructura absorbente. En cualquier caso la potencia absorbida es convertida en calor. Por lo tanto, para aplicaciones de alta potencia, sistemas de enfriamientos forzados, tales como enfriamiento por agua son necesarios.

La terminación de film resistivo de cuarto de onda consiste de un film resistivo localizado desde el punto final. El film es localizado en el punto en el cual se supone que la intensidad de campo es máxima y absorberá la energía muy bien. Este tipo de terminación es más sensible a la frecuencia

#### **Terminación de guía de onda modelo 910B**

Los modelos 910A y 910B son terminaciones para sistemas de guía de ondas operando a baja potencia promedio. Son diseñados de tal forma que la potencia es absorbida, asegurando un bajo SWR. Son útiles donde quiera que una carga acoplada es requerida, tales como en la medición del coeficiente de reflexión de una discontinuidad o de un obstáculo, en un sistema de guía de onda. Pueden ser usadas con líneas ranuradas, acopladores direccionales, reflectómetros; etc.

Los modelos 910A y 910B consisten de una sección de guía de onda

**Precauciones:**

- a) Inspección inicial: Inspeccionar la terminación verificando si no hay daños mecánicos en los flancos, en la guía de onda, o en la carga. La carga es muy frágil, y pudo ser rota si el paquete fue maltratado.
- b) Protección de flancos: Mantenga cubiertos los flancos de las terminaciones si no están siendo utilizadas, para evitar cualquier daño. Cualquier escoria en la guía causa discontinuidad, resultando en un incremento del SWR.
- c) Polvo y basura fuera de la guía: Use las tapas plásticas para mantener el polvo y la basura fuera de la terminación cuando no se la está usando.
- d) Protección de la carga: el bajo SWR del modelo 910 es debido a la forma y al material. El detalle crítico es la forma de la punta. Todas las cargas son relativamente largas y hechas de un material frágil, por lo que la punta es fácilmente rompible. Para preveer daños a la punta debemos observar los siguiente:

- Cuando use la terminación no la someta a golpes mecánicos.
  - Cuando la limpie no sople en el interior de la guía, presionando el aire sobre la punta.
  - Cuando la guarde, cubra los flancos con las tapas plásticas suministradas.
- e) Conexión de la terminación: Al conectar la terminación déjela fija observando que los flancos estén lisos y limpios; en caso contrario retornarla al fabricante.

**Especificaciones de la terminación utilizada:**

Productor:	Hewlett packard modelo X910B
Rango de frecuencia:	8.2-12.4 GHz
Máximo SWR:	1.015
Máxima potencia promedio:	1W
Peso:	1 lb
Longitud:	16.8 mm

**2.3.9 Antena tipo bocina**

Hay tres tipos de antenas bocina, la bocina de expansión plano E, la plano-H y la antena bocina piramidal.

La antena bocina plano-E da un agudo patrón de radiación en el plano E, y la antena bocina plano-H da un agudo patrón de radiación en el plano H. La antena piramidal da un patrón de radiación en ambos planos E y H. El plano E es un plano paralelo al campo E y el plano H es paralelo al campo H. El ancho del rayo del patrón de radiación es una función del ángulo de expansión y tiene generalmente un valor óptimo como ilustra la figura 2.18

Para ángulos de expansión grandes, modos espurios son fácilmente generados. Estos modos tienden a ensanchar el ancho del rayo y a generar lóbulos menores en el patrón de radiación.

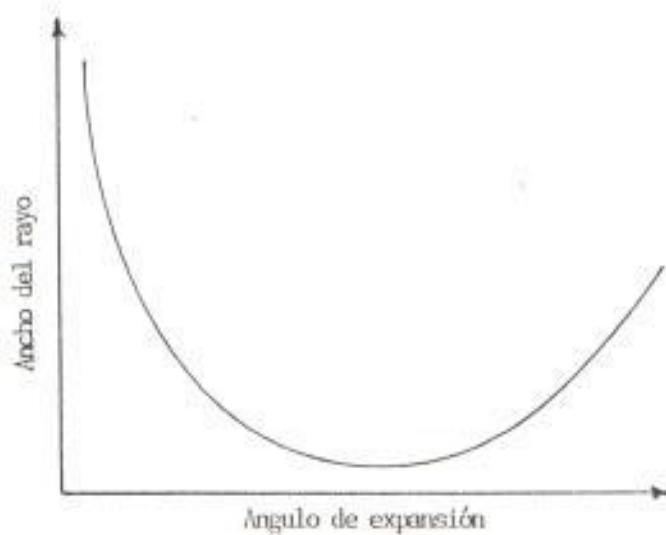
La ganancia de la antena bocina es también función del ángulo de expansión; la relación entre estos dos parámetros lo observamos en la figura 2.18(b)

Para ángulos de expansión, los modos espurios son generados y ellos tienden a disminuir la ganancia. Similar fenómeno es observado cuando la longitud de expansión es cambiada, manteniéndose el ángulo de expansión constante. Reflexiones desde el filo de la antena suelen causar variaciones periódicas de la ganancia o del ancho del radio como lo muestra la figura 2.19

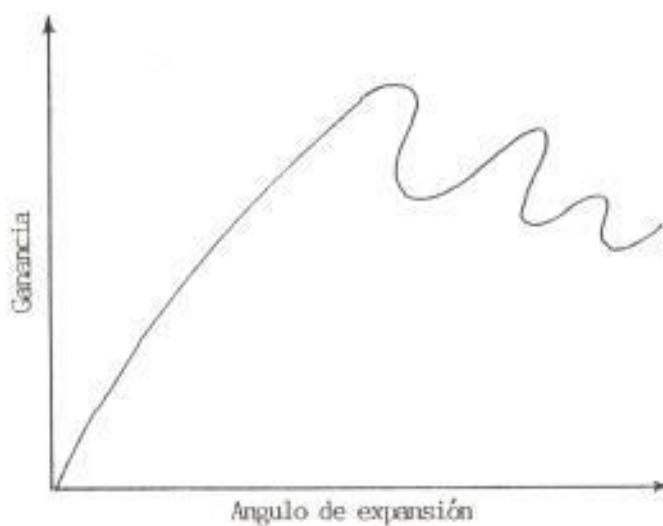
## Especificaciones de la antena bocina utilizada

Productor: Narda modelo 640

Rango de frecuencia: 8.2-12.4 GHz

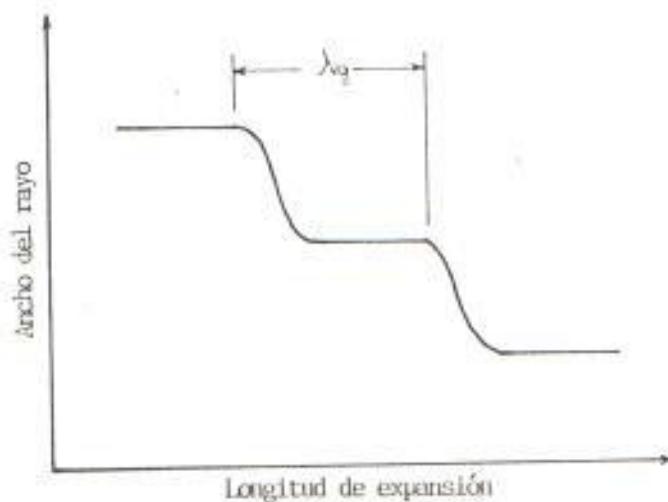


a) Ancho del rayo v.s. ángulo de expansión

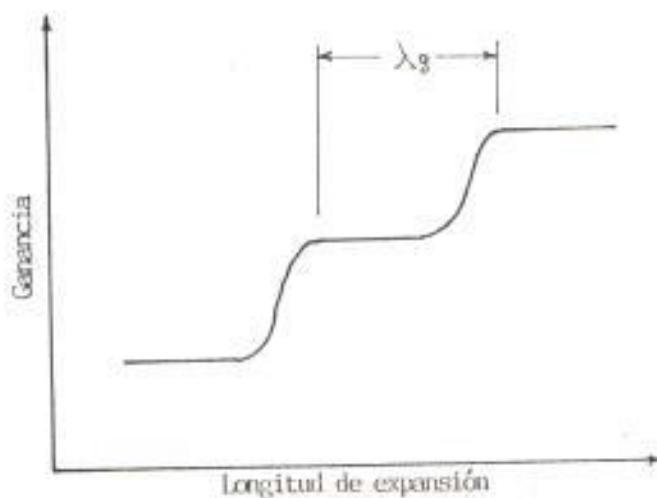


b) Ganancia v.s. ángulo de expansión

Fig. 2.18 Características típicas de la antena bocina con respecto a su ángulo de expansión



a) Ancho del rayo v.s. longitud de expansión



b) Ganancia v.s. longitud de expansión

Fig. 2.19 Características típicas de la antena bocina con respecto a su longitud de expansión

## CAPITULO III

### PRUEBAS EXPERIMENTALES EN GUIA DE ONDA

Una vez que hemos estudiado todo lo referente a la teoría de la interacción campo-insecto-material anfitrión, de los efectos que las microondas producen sobre los tejidos biológicos y haber estudiado cada uno de los equipos que utilizaremos en nuestro experimento, estamos listos para llevar a cabo las pruebas experimentales.

En este capítulo describiremos la metodología a usar en las pruebas de irradiación en la guía de onda. Explicaremos la forma en que resumiremos los resultados obtenidos. En las tablas I y II, y la nomenclatura que se utilizará para clasificar las deformaciones. Finalmente, los resultados de las pruebas experimentales quedarán tabulados para un posterior análisis de los mismos, tema que lo desarrollaremos en el capítulo V.

#### 3.1 Procedimiento

El procedimiento seguido para llevar a cabo las pruebas de irradiación con microondas fue el siguiente:

a) TRANSPORTE DE HUEVECILLOS DE SITOTROGA CEREALELLA (PALOMILLA DE MAIZ) DESDE LA ESTACION EXPERIMENTAL BOLICHE DEL INIAP, HASTA EL LABORATORIO DE RADIO-FRECUENCIA

Ante la inexistencia de pupas en la estación experimental Boliche del INIAP y debido a que el tratamiento con microondas era aconsejable hacerlo con pupas de 1 a 5 días de edad (9), lo que indicaba llevar a cabo un control diario de las diferentes etapas del insecto, fue necesario tener un criadero de pupas, para lo cual se transportó los huevecillos desde la estación experimental a la ESPOL.

b) TRATAMIENTO DE LOS GRANOS DE MAÍZ Y DE ARROZ PREVIA SU INFESTACION CON LOS HUEVECILLOS DE DICHO INSECTO

Antes de infestar los granos de maíz y de arroz, era necesario tratarlos, puesto que podría ser que los mismos estuviesen infestados de la otra plaga. El tratamiento se lo hizo colocando los granos en un recipiente con agua poniéndolo al fuego hasta alcanzar el punto de ebullición, una vez conseguido ésto se procedió al secado de los granos, para evitar su descomposición.

c) PREPARACION DE LOS ELEMENTOS DE PRUEBA (PUPAS Y ANFITRION-PUPAS) PREVIO SU TRATAMIENTO CON MICROONDAS

Fue necesario sacar las pupas del interior de los granos y colocarlos en cápsulas de polietileno, previo su tratamiento con microondas. Es de hacer notar que las pupas se las debía de obtener sin ninguna lesión, puesto que esto podría llevarnos a resultados erróneos. Debo añadir que las pupas se obtuvieron de los granos de maíz, ya que la cría en los granos de arroz no dio los resultados esperados. El número de pupas obtenidas fue ínfimo (15) en comparación con el número de huevecillos colocados (600); además de que la obtención de las pupas no era nada fácil, resultando por demás delicado y engorroso. En la selección de los granos infestados con pupas no se presentaron problemas.

Para realizar las irradiaciones se tomaron muestras de 10 elementos. Los mismos que fueron sometidos a 1, 2 y 3 horas de irradiación con potencias de 8 y 15 mW. Se consideró conveniente tener testigos de control, para así llevar a cabo una comparación entre elementos irradiados y no irradiados.

#### d) CALIBRACION Y CONTROL DE LOS EQUIPOS DE MICROONDAS DURANTE EL TRATAMIENTO

Se calibraron los equipos a la potencia de irradiación deseada, se chequeó el tiempo de irradiación (1, 2 ó 3 horas) y se controló que el sistema de microondas funcione correctamente durante el tratamiento.

## e) OBSERVACIONES Y CLASIFICACION DE LOS RESULTADOS DE LA IRRADIACION CON MICROONDAS

Después de la irradiación las observaciones se las llevaron a cabo todos los días hasta que ya no emergieron adultos. Esto nos llevó de 11 a 12 días de control.

La clasificación de los resultados se la realizó considerando las pupas que habían muerto y los adultos que habían emergido de las pupas tratadas, separándolos a su vez en adultos normales y adultos que presentaban deformaciones.

La nomenclatura utilizada para clasificar las deformaciones fue:

- D1: Adulto con las alas dobladas
- D2: Adulto con ala izquierda de menor tamaño
- D3: Adulto adherido al cocón pupal
- D4: Adulto con ala derecha de menor tamaño
- D5: Adulto con las patas delanteras alargadas y dobladas
- D6: Adulto con ala adherida al cuerpo
- D7: Adulto que da la impresión de haber sido aplastado
- D8: Adulto con alas totalmente aplastadas

### 3.2 Tabulación de resultados

Los resultados obtenidos de la irradiación con microondas sobre pupas de sitotroga cerealella cultivadas en maíz -pruebas llevadas

a cabo en guía de onda-, las resumimos en las tablas I y II.

La tabla I nos resume las observaciones sobre las pupas solas y la tabla II las observaciones sobre las pupas enbebidas en el grano de maíz.

En la tabulación de las pruebas experimentales, además de señalar la potencia aplicada y el tiempo de irradiación, indicamos la densidad de potencia ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) y la dosis de energía ( $\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ ) recibida por los elementos de prueba. Tales valores los calculamos de la siguiente forma:

$$\text{Densidad de potencia} = \frac{\text{Potencia aplicada (mW)}}{\text{Area transversal de la guía de onda (cm}^2\text{)}}$$

$$\text{Dosis} = \frac{\text{Densidad de potencia (mW/cm}^2\text{)}}{\text{duración (h)}}$$

donde:

$$\text{Area transversal de la guía de onda} = 2.32 \text{ cm}^2$$

Además de lo señalado se utiliza la nomenclatura mencionada en la sección anterior (sección 3.1) para poder clasificar las deformaciones observadas en los elementos tratados y en los de control.

Con los antecedentes ya mencionados podemos resumir nuestros resultados en las siguientes tablas experimentales:

TABLA I

Observaciones sobre pupas de Sitotroga Cerealella irradiadas en gafa de onda ( $f= 9$  GHz)

Prueba	Potencia Aplicada (mW)	Duración (h)	Densidad Potencia (mW/cm <sup>2</sup> )	Dosis ( $\mu$ W/cm <sup>2</sup> .h)	Tratadas			Control			Total Pupas
					Adultos Normales	Deformes	Muertas	Adultos Normales	Deformes	Muertas	
1	8	1	3.44	3.44	8(80%)	1(10%) D1	1(10%)	8(80%)	1(10%) D3	1(10%)	20
2	8	2	3.44	1.72	9(90%)	1(10%) D2	0(0%)	6(75%)	2(25%) D3D4	0(0%)	18
3	8	3	3.44	1.15	7(87.5%)	1(12.5%) D7	0(0%)	5(62.5%)	2(25%) D1D3	1(12.5%)	16
4	15	1	6.46	6.46	7(70%)	2(20%) D8	1(10%)	8(80%)	1(10%) D3	1(10%)	10
5	15	2	6.46	3.23	8(80%)	2(20%)D2(D3+ D1)	0(0%)	6(75%)	2(25%) D3D4	0(0%)	10
6	15	3	6.46	2.15	6(75%)	1(12.5%) D8	1(12.5%)	5(62.5%)	2(25%) D1D3	1(12.5%)	8

TABLA II

Observaciones sobre anfitrión pupas de Sitotroga Cerealella radiados en gafa de onda (f= 9GHz)

Prueba #	Potencia Aplicada (mW)	Duración (h)	Densidad Potencia (mW/cm <sup>2</sup> )	Dosis (mW/cm <sup>2</sup> .h)	Tratadas			Control			Total Pupas	
					Adultos Normales	Deformes	Muertas	Adultos Normales	Deformes	Muertas		
1	8	1	3.44	3.44	7(70%)	0(0%)	3(30%)	7(70%)	3(30%)	3D8	0(0%)	20
2	8	2	3.44	1.72	7(70%)	1(10%)	2(20%)	7(70%)	3(30%)	3D8	0(0%)	20
3	8	3	3.44	1.15	11(100%)	0(0%)	0(0%)	4(40%)	4(40%)	D13D8	2(20%)	21
4	15	1	6.46	6.46	6(60%)	2(20%)	2(20%)	7(70%)	3(30%)	3D8	0(0%)	20
5	15	2	6.46	3.23	6(60%)	1(10%)	3(20%)	8(80%)	0(0%)		2(20%)	20
6	15	3	6.46	2.15	10(100%)	0(0%)	0(0%)	10(83.5%)	2(16.5%)	2D8	0(0%)	22
7*	15	2	6.46	3.23	14(93.3%)	0(0%)	1(6.7%)	14(70%)	0(0%)		6(30%)	35

Observaciones: La prueba #7 es una irradiación extra a un barrido de frecuencia de 9-11 GHz.

## CAPITULO IV

### PRUEBAS EXPERIMENTALES A ESPACIO LIBRE

En el capítulo anterior habíamos realizado las pruebas de irradiación colocando las pupas y los granos infestados con pupas de *Sitotroga Cerealella* en el interior de la guía de onda. A esto habíamos llamado irradiación en guía de onda.

Tomando en cuenta que deseamos controlar las plagas en granos almacenados en silos, se consideró conveniente realizar irradiaciones sobre pupas y granos infestados con pupas a través de una antena, para poder observar los efectos de la irradiación. Es aquí que este capítulo abordará sobre este tipo de pruebas experimentales. A las que hemos denominado de espacio libre.

Explicaremos los pasos seguidos para la irradiación, la forma en que tabularemos los resultados y finalmente resumiremos los resultados en las tablas III y IV.

#### 4.1 Procedimiento

El circuito que se utilizará para estas pruebas fue descrito con anterioridad en la sección 2.2.2, siendo básicamente el mismo que se

utilizó para las pruebas en guía de onda, con la diferencia de que por terminación colocamos ahora una antena para permitir la irradiación a espacio libre, y un absorbedor de energía para evitar la propagación de dicha radiación en el medio ambiente.

El procedimiento seguido, el tipo de control y la nomenclatura para las deformaciones encontradas, son los mismos que se utilizaron en el capítulo III.

#### 4.2 Tabulación de los resultados

Los resultados obtenidos de la irradiación con microondas a espacio libre, sobre las pupas de *Sitotroga Cerealella*, las resumimos en las tablas III y IV.

La tabla III nos resume las observaciones sobre las pupas solas y la tabla IV las observaciones sobre anfitrión-pupas.

la nomenclatura utilizada en la tabulación es la misma que se utilizó en el capítulo III sección 3.2, por lo que no será necesario volver a describirla. A continuación resumiremos los resultados en las tablas experimentales ya mencionadas:

TABLA III

Observaciones sobre pupas de Sitotroga Cerealella irradiadas a espacio libre ( $f =$  GHz)

Prueba	Potencia Aplicada (mW)	Duración (h)	Densidad Potencia (mW/cm <sup>2</sup> )	Dosis (mW/cm <sup>2</sup> .h)	Tratadas			Control			Total Pupas
					Adultos Normales	Deformes	Muertas	Adultos Normales	Deformes	Muertas	
1	8	1	3.44	3.44	9(90%)	1(10%) D3	0(0%)	8(80%)	1(10%) D3	1(10%)	10
2	8	2	3.44	1.72	7(70%)	1(10%) D7	2(20%)	6(75%)	2(25%) D3D4	0(0%)	10
3	8	3	3.44	1.15	9(90%)	1(10%) D5	0(0%)	5(62.5%)	2(25%) D1D3	1(12.5%)	10
4	15	1	6.46	6.46	6(60%)	3(30%)D1D3D7	1(10%)	8(80%)	1(10%) D3	1(10%)	10
5	15	2	6.46	3.23	7(63.6%)	4(36.4%)D1D22D9	0(0%)	6(75%)	2(25%) D3D4	0(0%)	11
6	15	3	6.46	2.15	9(90%)	0(0%)	1(10%)	5(62.5%)	2(25%) D1D3	1(12.5%)	10

Observaciones: Las pupas utilizadas para control fueron las mismas de la tabla I.

TABLA IV

Observaciones sobre anfitrión-pupas de Sitotroga Cerealella irradiados a espacio libre (f= 9GHz)

Prueba	Potencia Aplicada (mW)	Duración (h)	Densidad Potencia (mW/cm <sup>2</sup> )	Dosis (mW/cm <sup>2</sup> .h)	Tratadas			Control			Total Pupas
					Adultos Normales	Deformes	Muertas	Adultos Normales	Deformes	Muertas	
1	8	1	3.44	3.44	8(80%)	1(10%) D4	1(10%)	7(70%)	3(30%) 3D8	0(0%)	10
2	8	2	3.44	1.72	7(70%)	0(0%)	3(30%)	7(70%)	3(30%) 3D8	0(0%)	10
3	8	3	3.44	1.15	8(80%)	1(10%) D6	1(10%)	4(40%)	4(40%) D13D8	2(20%)	10
4	15	1	6.46	6.46	10(100%)	0(0%)	0(0%)	7(70%)	3(30%) 3D8	0(0%)	10
5	15	2	6.46	3.23	8(80%)	0(0%)	2(20%)	8(80%)	0(0%)	2(20%)	10
6	15	3	6.46	2.15	7(70%)	0(0%)	3(30%)	10(83.5%)	2(15.5%) 2D8	0(0%)	10

Observaciones: Los anfitrión-pupas utilizados para control son los mismos de la tabla II.

## CAPITULO V

### EVALUACION Y CORRELACION DE RESULTADOS

Después de las irradiaciones llevadas a cabo, tanto en guía de onda como en espacio libre, resulta de interés realizar una evaluación y una correlación de estos resultados con los obtenidos por otros investigadores.

En este capítulo realizaremos este análisis, a partir de las observaciones reunidas en las tablas I, II, III y IV, de los capítulos III y IV.

#### 5.1 Evaluación de resultados

Las observaciones reunidas en las tablas las podemos resumir en los gráficos 5.1 y 5.2. Realizando una evaluación de los porcentajes de deformaciones y muertes a partir de estos gráficos, podemos deducir que:

- a) No se observan diferencias significativas en las irradiaciones llevadas a cabo, sea en guía de onda o en espacio libre (observación válida para las pupas y los anfitrión-pupas).

- b) Las deformaciones observadas sobre las pupas no muestran diferencias significativas, es más el porcentaje de pupas deformes en las de control, es mayor que las tratadas. Algo similar observamos en las pupas muertas.
  
- c) Se observa un menor número de deformaciones en los adultos provenientes de anfitrión-pupas que han sido tratados, en comparación con las de control. El porcentaje de deformaciones es considerable (17.75% en guía de onda y 20.75% en espacio libre, de diferencia).
  
- d) Se observa un resultado positivo en las irradiaciones sobre anfitrión-pupas. El porcentaje de muertes es ligeramente significativo en comparación con los de control (7.33% en guía de onda y 10% en espacio libre de diferencia).

## 5.2 Correlación con otros resultados

Realizando una correlación con los resultados obtenidos por otros investigadores se puede observar que hay algunas discrepancias, así como puntos de mutuo acuerdo. Haciendo un análisis de estas observaciones, tenemos que:

- a) Del trabajo realizado por E. W. Tilton (5) para controlar las infestaciones de *Sitotroga Cerealella* en granos almacena-

dos, observamos que la misma fue completamente controlada en centeno y maíz, pero parcialmente controlada (96.8%) en trigo. Tilton realizó su tratamiento con 0.25 PDU<sup>(1)</sup> de energía y un vacío parcial de 35 torr durante 10 minutos. Siguiendo el mismo tratamiento, logró resultados altamente favorables en plagas como la Rhysopertha dominica que infestaban el maíz, centeno y trigo, el sitophilus oryzae en centeno y trigo y el sitophilus zeamais en maíz, logrando controlar la plaga en porcentaje mayores al 99%, resultados que discrepan con los nuestros.

- b) El reporte presentado por Kirkpatrick (6), habla de un control de la rhysopertha dominica en trigo en un 24%, utilizando irradiación con microondas en guía de onda, y de un 96% de control al combinar irradiaciones de gamma + microondas.
- c) Informes presentados por otros investigadores, tales como G.A. Lindauer (3) y L. M. Liu (4), al haber irradiado pupas del Tenebrio Molitor, indican que se infligen daños teratogénicos sobre esta plaga, los mismos que son significativos para niveles de potencia mayores a  $8.6 \text{ mW/cm}^2$ . Estos daños significativos no los pudimos observar en nuestro experimento.

---

(1) Este término ha sido usado por Tilton para indicar densidades relativas de potencia. Esto ha sido hecho para proteger la propiedad de Mc Donnell Aircraft Co. hasta que la patente haya sido procesada.

- d) Los resultados obtenidos concuerdan con las investigaciones llevadas a cabo por H.S. Whitney (9), sobre el escarabajo del monte de pino (MPB), en el sentido de no obtener los resultados que esperaba. Whitney encontró que esta plaga es más resistente a la irradiación de microondas que el Tenebrio Molitor según trabajos anteriormente realizados; incluyendo las pruebas que él mismo llevó a cabo sobre el Tenebrio Molitor, para verificar los resultados de G.A. Lindauer y de L. M. Liu, discrepando con las conclusiones obtenidas por estos investigadores.

El resultado de las investigaciones llevó a Whitney a la conclusión de que la respuesta a irradiación de bajo nivel de potencia (10, 20, 40, 50, 100 mW) es una función de las condiciones fisiológicas de las células y los tejidos irradiados. Esta condición puede variar -de hecho- amplia y enérgicamente en una misma especie. Los mismos resultados también sugieren que para los niveles estándares de seguridad de microondas debería considerarse la naturaleza dinámica de las propiedades biológicas de los organismos a ser irradiados.

- e) Del trabajo realizado por J.E. Page (2) sobre el díctero Ceratitis Capitata que infesta las frutas y el coleóptero Tribolium Castaneum que infesta cereales y harinas -hasta

el momento de tomar la información no habían datos completos sobre los resultados-, se destaca que ni el número de malformaciones ni el número de huevos en la puesta ha resultado significativamente diferente en las especies tratadas, respecto de los testigos, lo que parece indicar que los efectos térmicos han sido eficazmente contrarrestados por el mecanismo termoregulador del insecto y que no se han producido efectos no-térmicos.

Las observaciones anotadas nos permitirán extraer una mejor conclusión del trabajo de investigación realizado, así como dar las recomendaciones más adecuadas.

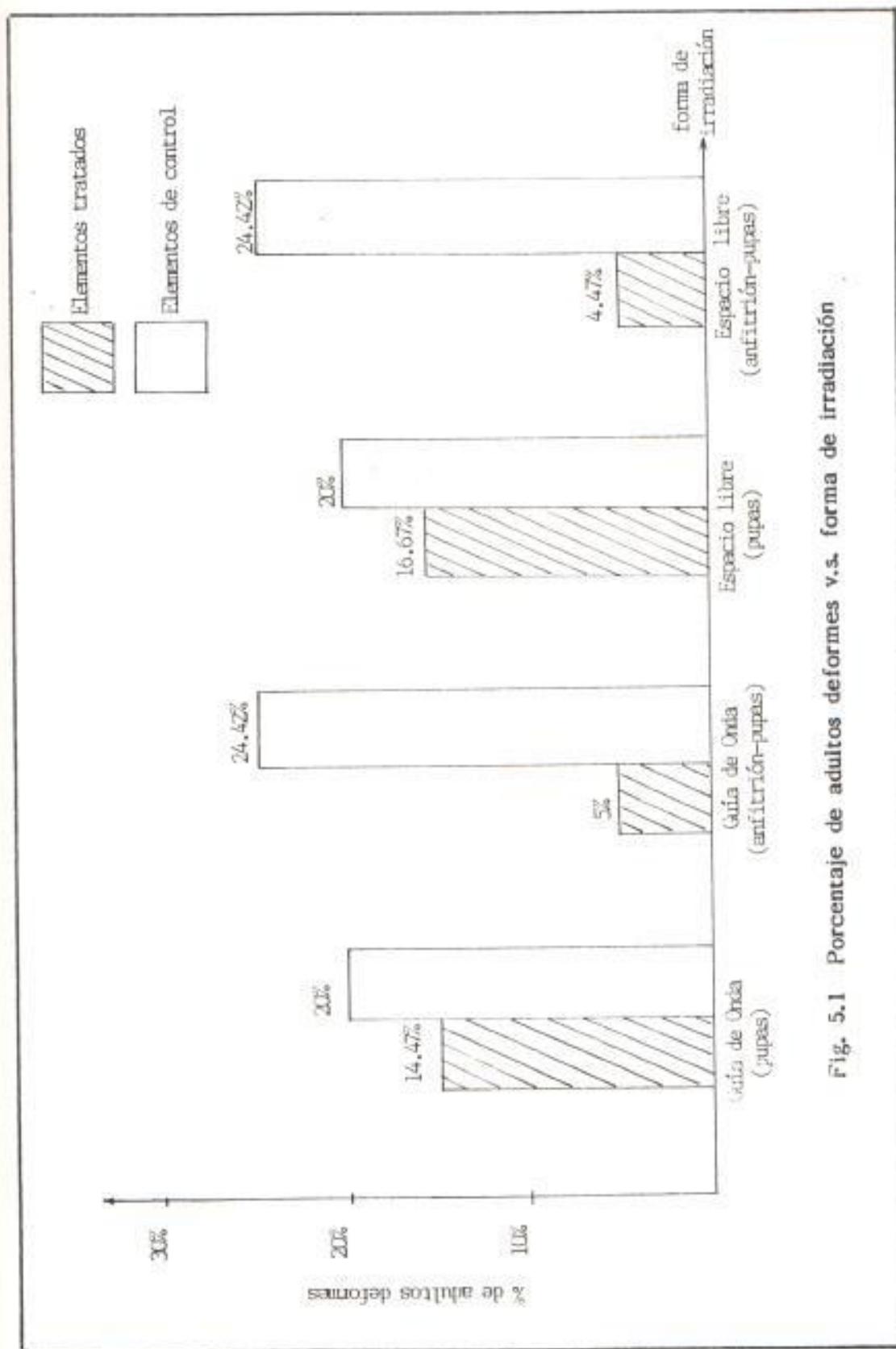


Fig. 5.1 Porcentaje de adultos deformes v.s. forma de irradiación

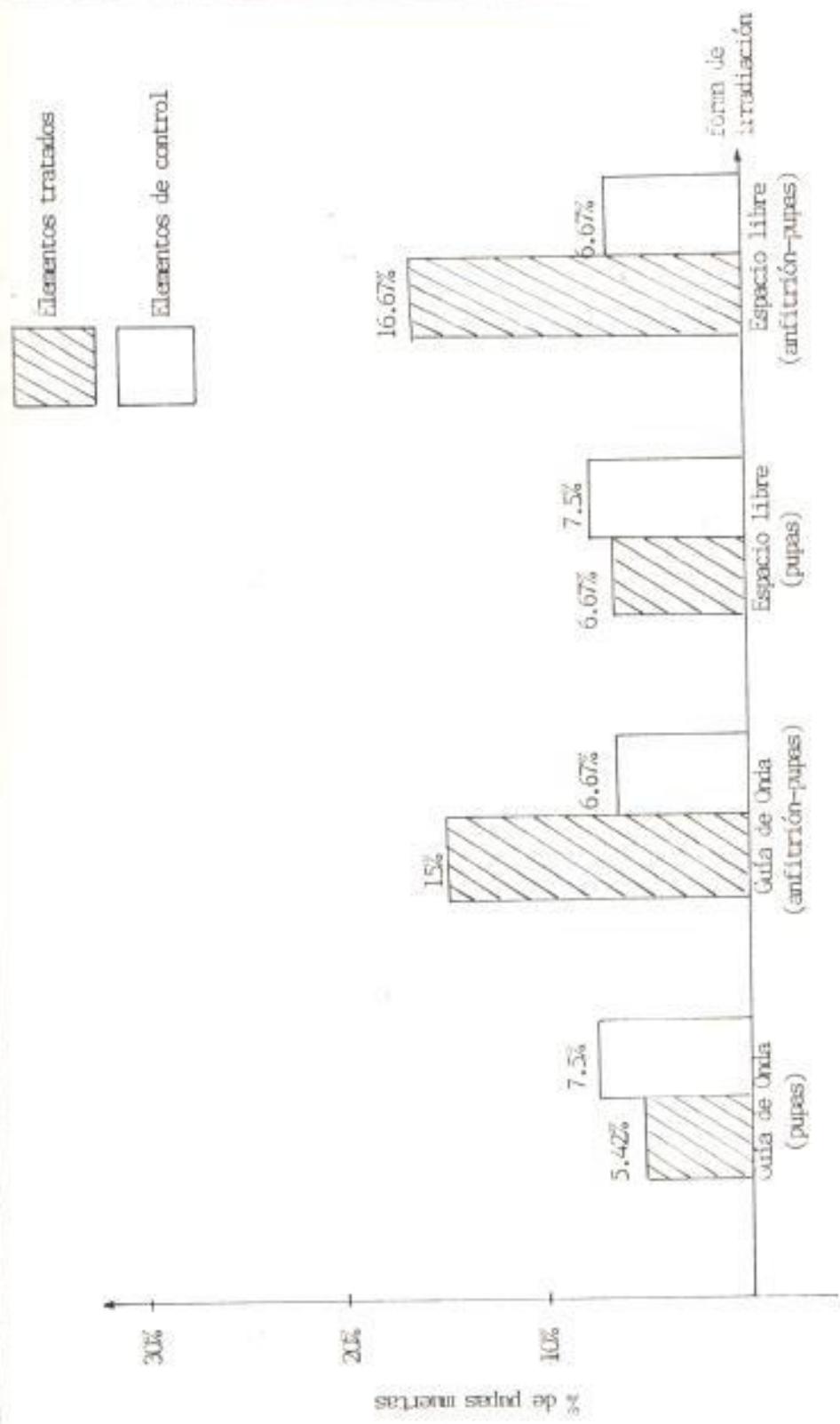


Fig. 5.2 Porcentaje de pupas muertas v.s. forma de irradiación

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De las observaciones a las tablas de control, de la evaluación gráfica hecha a los resultados y del haber observado una mayor movilidad en los adultos tratados, podemos concluir que:

1. La respuesta a irradiación de bajo nivel de potencia es una función de las condiciones fisiológicas de las células y de los tejidos irradiados; respuesta que puede variar significativamente en una misma especie.
2. En las pruebas realizadas, no se observan efectos teratogénicos que sean decisivos, esto nos lleva a pensar que los mismos han sido eficazmente contrarrestados por el mecanismo termoregulator del insecto.
3. El resultado de las pruebas efectuadas, indica que la radiación de microondas acelera el proceso fisiológico de la Sitotroga Cerealilla, de tal forma que ayuda a la emergencia de los adultos y a su vez los hace más resistentes. Esta consideración se desprende al haberse observado una mayor movilidad en los adultos tratados.
4. La mayor movilidad en los adultos tratados, en este estudio

experimental, nos lleva a pensar que los mismos consumen mayor cantidad de energía que los no tratados. Este "exceso de energía", según lo explica el entomólogo asesor, lo deben extraer de las proteínas que tienen en su cuerpo graso y que sirve para la producción de huevecillos. Luego, las hembras provenientes de pupas irradiadas podrían tener una menor producción de huevecillos. Esto es, el sistema reproductivo del insecto ha sido afectado por la irradiación.

El estudio realizado nos ha arrojado información valiosa, de los efectos que las microondas producen sobre las pupas del insecto *Sitotroga Cerealella*, la misma que servirá de orientación para futuras investigaciones que se pudieran realizar en este campo, tendientes a un control de plagas en la agricultura por métodos no convencionales. Tomando en consideración este criterio, algunas de las recomendaciones que se podrían hacer son:

1. Utilizar en futuros proyectos, equipos generadores de microondas que arrojen potencias mayores a 15 mW (20, 40, 80, 100 mW).
2. Llegar a un acuerdo entre el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) y la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), con la finalidad de llevar a cabo un Programa de Investigaciones que continúe con el estudio realizado, pudiendo extenderse el mismo a otras variedades de plagas.
3. Llevar a cabo la irradiación de huevecillos de la *Sitotroga* y

luego seguir su desarrollo hasta futuras generaciones 1 ó 2 generaciones- para poder constatar una disminución concreta de la población proveniente de los huevecillos tratados.

4. En proyectos posteriores en donde se estudia los efectos de la radiación de microondas sobre las pupas de insectos, tanto en guía de onda como en espacio libre, será necesario tomar en consideración no solo el efecto de la irradiación electromagnética, sino también el efecto de los parámetros ambientales en que reside la pupa, tales como temperatura, presión atmosférica, humedad; etc. Por lo tanto, sería necesario contar con el equipo e infraestructura adecuados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ROSSLER, Y. "Aplicaciones de la técnica insectos estériles (IIS) para el control de la mosca MED", México, 1970, 3-10 p.
2. PAGE, J.E. y CAMACHO C. "Efecto de la radio-frecuencia sobre los insectos: aplicación en el control de plagas", Mundo Electrónico No.113, enero 1982, 83-90 p.
3. LINDAUER, G.A., LIU, L.M., SKEWES, G.W. y ROSENBAUM F.J., "Further experiments seeing evidence of nonthermal biological effects of microwave radiation", IEEE Trans. en MIT, vol. MIT-22, agosto 1974, 790-793 p.
4. LIU, L.M., ROSENBAUM, F.J. y PICKARD, W.F., "The relation of teratogenesis in *Tenebrio Molitor* to the incidence of low-level microwaves", IEEE Trans. on MIT, vol. MIT-23, noviembre 1975, 929-931 p.
5. TILTON E.W. y VARDELL, H.H., "Combination of microwaves and partial vacuum for control of course stored-product insects in stored grain", J. Georgia Entomological Society, vol.17 No.1, junio 1981, 106-112 p.
6. KIRKPATRICK, R.L., BROWER, J.H. y TILTON, E.W., "Gamma, infra-red and microwave radiation combinations for control of *Rhyzopertha Dominica* in Wheat", J. stored Prod. Res., vol.9, 1973, 19-23 p.
7. BECERRA, C. "Energía de alta frecuencia para controlar plagas en la agricultura", Poligira, 1982, 58-62 p.

8. NELSON, S.O., "Possibilities for controlling insects with microwaves and lower frequency RF energy", IEEE Trans. on MTT, diciembre 1974, 1303-1305 p.
9. WHITNEY H.S. and KHARADLY M.M.Z., "Some results on low-level microwave treatment of the mountain pine beetle and the darkling beetle", IEEE Trans. on MTT, vol MTT-32, No.8, agosto 1984, 798-802 p.
10. HEWLETT PACKARD, manuales de laboratorio:
  - Manual del oscilador de barrido 8620C, 1972
  - Manual del módulo RF plug-in 86250A, 1972.
  - Manual del adaptador 281A/B, 1973, 2-3p.
  - Manual del atenuador variable 375A, 1968, 2p.
  - Manual del filtro pasa-bajo 362A, 1968, 1p.
  - Manual del acoplador direccional 752, 1967, 1-2p.
  - Manual del termistor modelo 486A, 1978, 2-4p.
  - Manual de la terminación de guía de onda 910A/B, 1980, 2-3p.
11. KORYU, ISHII T., "Microwave engineering", de Ronald Press Company, New York, 1966, 127-163p.
12. REITZ, MILFORD y CHRISTY, "Fundamentos de la teoría electromagnética", Fondo Educativo Interamericano, México D.F., 1984, 55-62p.
13. SAENZ, RAMIRO, "Estudio y diseño de un medidor de potencia de microondas", Tesis, Facultad de Ingeniería Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1971, 21-30p.

## APENDICES

## APENDICE A

### ARMONICOS DE ZONA

La ley de Gauss, en su forma diferencial nos dice que:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (\text{A.1})$$

Además, en un campo puramente electrostático,  $\mathbf{E}$  puede expresarse como el negativo del gradiente del potencial :

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (\text{A.2})$$

Combinando (A.1) y (A.2) obtenemos:

$$\nabla \cdot \nabla\varphi = -\rho/\epsilon_0 \quad (\text{A.3})$$

Conviene considerar la divergencia del gradiente como un operador diferencial  $\nabla \cdot \nabla$  o  $\nabla^2$ . Se prefiere la última notación, y el operador se llama **Laplaciano**.

$$\nabla^2\varphi = -\rho/\epsilon_0 \quad (\text{A.4})$$

Es evidente que el Laplaciano es un operador diferencial escalar y (A.3) es una ecuación diferencial. Esta es la **ecuación de Poisson**. El operador  $\nabla^2$  implica la derivación con respecto a más de una variable; en conse-



cuencia, la ecuación de Poisson es una **ecuación diferencial parcial** que puede resolverse una vez que se conoce la dependencia funcional de  $\rho(x, y, z)$  y las condiciones adecuadas en la frontera.

El operador  $\nabla^2$ , así como el  $\nabla \cdot \nabla \cdot \nabla_x$  no tienen referencia en ningún sistema de coordenadas particular. Para resolver un problema determinado, debemos expresar en función de  $x, y, z$  o  $r, \theta, \phi$ , etc. La elección del sistema de coordenadas es arbitrario, pero se logrará una extraordinaria simplificación del problema si se elige un sistema compatible con la simetría del problema electrostático.

Para coordenadas esféricas:

$$\nabla^2 \psi \equiv \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \quad (\text{A.5})$$

En ciertos tipos de problemas electrostáticos en donde se suele anular la densidad de carga  $\rho$ , la ecuación de Poisson se reduce a una forma más sencilla

$$\nabla^2 \psi = 0 \quad (\text{A.6})$$

Qué es la **ecuación de Laplace**

Si  $\psi$  fuera una función de más de una variable, el problema es complicado. Sin embargo, muchos problemas físicos de interés, tal como el de una esfera dieléctrica embebida en un campo electromagnético, queda dentro de la categoría en que  $\psi$  es independiente del ángulo azimutal



y este es el caso que vamos a analizar.

Para el caso esférico  $\Psi$  es  $\Psi(r, \theta)$  donde  $r$  es el radio vector que va desde un origen fijo  $0$  y  $\theta$  es el ángulo polar (fig. A.1) utilizando la ecuación (A.5). La ecuación de Laplace se convierte en:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right) = 0 \quad (\text{A.7})$$

Esta ecuación diferencial parcial se puede resolver por una técnica conocida como **separación de variable**. Esto es,  $\Psi(r, \theta) = Z(r)P(\theta)$  sustituyendo en (6):

$$\frac{1}{r^2} P(\theta) \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dZ}{dr} \right) + \frac{Z(r)}{r^2 \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left( \sin \theta \frac{dP}{d\theta} \right) = 0 \quad (\text{A.8})$$

Obsérvese que las derivadas parciales han sido sustituidas por derivadas totales, puesto que  $Z$  y  $P$  son funciones de una sola variable. Dividiendo por  $\Psi(r, \theta)$  y multiplicando por  $r^2$ , transformamos (A.8) en

$$\frac{1}{Z} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dZ}{dr} \right) = - \frac{1}{P \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left( \sin \theta \frac{dP}{d\theta} \right) \quad (\text{A.9})$$

El primer miembro de (A.8) es una función únicamente de  $r$  y el segundo es tan solo de  $\theta$ ; la única forma en que una función de  $r$  puede ser igual a una función de  $\theta$  para todos los valores de  $r$  y  $\theta$  es que ambas funciones sean constantes. En consecuencia:

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left( \sin \theta \frac{dP}{d\theta} \right) = KP \quad (\text{A.10})$$



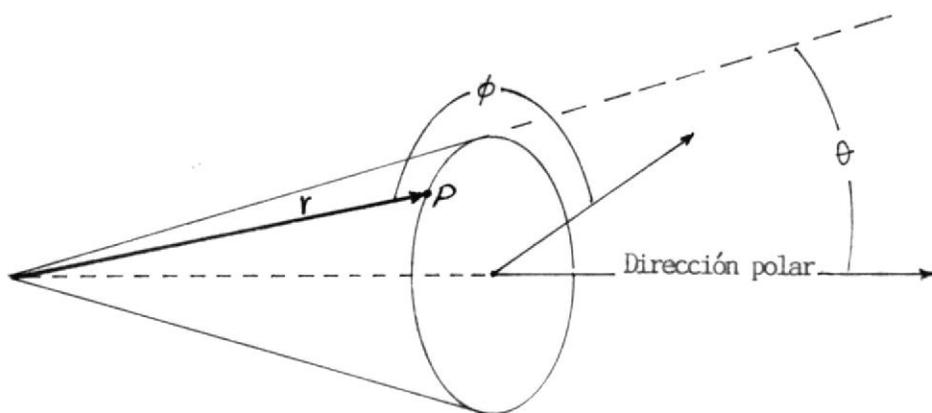


Fig. A.1 Localización del punto P en función de las coordenadas esféricas  $r$ ,  $\theta$ ,  $\phi$



$$\frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dz}{dr} \right) = KZ \quad (\text{A.11})$$

donde K la llamaremos "constante de separación".

No todos los valores de K proporcionan soluciones aceptables con bases físicas. La ecuación A.10 es llamada **ecuación de Legendre** y las únicas soluciones físicamente aceptables, definidas en un intervalo  $0 \leq \theta \leq \pi$  corresponden a  $K = n(n + 1)$ , donde n es un número entero positivo. Las soluciones para otros valores de K no se comportan bien en la vecindad de  $\theta = 0$  ó  $\theta = \pi$  radianes, volviéndose infinitas o aún indefinidas, por lo que, al no ajustarse a condiciones físicas en la frontera, dichas soluciones deben descartarse.

Las soluciones aceptables para un n en particular,  $P_n(\theta)$ , son polinomios en  $\cos \theta$ , que generalmente se los denominan polinomios de Legendre, Las primeras cuatro funciones de Legendre se dan en la tabla 1. Es evidente de A.10 que los  $P_n(\theta)$  pueden multiplicarse por una constante arbitraria.

**Tabla A Polinomio de Legendre**

n= 0, 1, 2 y 3	
n	$P_n(\theta)$
0	1
1	$\cos \theta$
2	$\frac{1}{2} (3 \cos^2 \theta - 1)$
3	$\frac{1}{2} (5 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta)$



Por su parte la ecuación radial (A.11) podríamos expresarla en la forma:

$$\frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dZ}{dr} \right) = n(n+1)Z \quad (\text{A.12})$$

donde hemos empleado la forma explícita de  $K$ , que dio soluciones de  $\theta$  aceptables. Observando (A.12) notamos que dos soluciones independientes son:

$$Z_n = r^n \quad \text{y} \quad Z_n = r^{-(n+1)}$$

Las soluciones de la ecuación de Laplace se obtienen por el producto  $\psi_{n(r,\theta)} = Z_n(r) \times P_n(\theta)$  donde debe tenerse particular cuidado para que  $Z$  y  $P$  correspondan al mismo valor de  $n$ . Esto es imprescindible, puesto que ambos miembros de la ecuación (A.9) son iguales a la misma constante, esto es,  $n(n+1)$ .

Como resultado de la exposición anterior, se ha resuelto la ecuación de Laplace en coordenadas esféricas, obteniéndose así las soluciones conocidas como ARMONICOS DE ZONA:

$$\psi_n = r^n P_n(\theta) \quad \text{ó} \quad \psi_n = r^{-(n+1)} P_n(\theta) \quad (\text{A.13})$$

donde  $P_n(\theta)$  es uno de los polinomios de la tabla 1 y  $n$  es un entero positivo o cero. La solución para  $n=0$ , es decir,  $\psi = \text{cte}$ , es una solución trivial de la ecuación de Laplace, válida en cualquier sistema de coordenadas; el armónico de zona  $r^{-1}$  es el potencial de una carga puntual, y  $r^{-2} \cos \theta$  es el potencial de un dipolo.

## APENDICE B

### FOTOGRAFIAS

Considerando la importancia y lo necesario de las fotografías en una tesis, se tomaron algunas que resumen, el circuito de microondas, el procedimiento y los resultados obtenidos. Es así que en este apéndice anexaremos dichas fotografías y las describiremos en forma breve.

Fig. B.1 Nos muestra la fotografía del oscilador de barrido modelo 8620C, ensamblado con el módulo RF 86250A, y que constituyó el equipo generador de la señal de microondas.

Fig. B.2 Fotografía que indica la ubicación de la cápsula de polietileno conteniendo pupas, en el sistema de irradiación en guía de onda. Observamos que la cápsula está entre la unión del acoplador direccional y la terminación.

Fig. B.3 Fotografía en la que se observa las pupas colocadas en la cápsula de polietileno, listas para las pruebas de irradiación, en guía de onda. El equipo sostenido con las manos es el acoplador direccional.

Fig. B.4 En esta fotografía observamos el circuito completo de micro-



ondas para la irradiación a espacio libre. Se puede apreciar el generador de microondas, adaptador, atenuador, filtro pasa-bajo, acoplador direccional, termistor, medidor de potencia, antena bocina, cápsula de polietileno, absorbedores de microondas, y en la parte superior izquierda el medidor de radiación con su respectivo detector (esfera blanca).

Fig. B.5 Observamos en esta foto, la forma de irradiar a espacio libre, los granos de maíz infestados con pupas. Se observan en la misma la antena de microondas, los granos infestados y el absorbedor de radiación.

Fig. B.6 En esta foto tenemos las pupas extraídas de los granos de maíz, colocadas en una caja pirex, y listas para ser irradiadas.



BIBLIOTECA

Fig. B.7 Finalmente, esta fotografía nos muestra ciertas deformaciones de los adultos provenientes de pupas tratadas. Lamentablemente la fotografía no es muy nítida, debido a que el lente de la cámara no era el adecuado. Estos adultos tienen 9 mm de longitud x 2 mm de ancho, aproximadamente. El tipo de deformaciones que se observa es:

- 1) Adulto adherido al cocón pupal (D3)
- 2) Adulto con ala adherida al cuerpo (D6)
- 3) Adulto normal
- 4) Adulto que da la impresión de haber sido aplastado (D7)

5) Adulto con alas aplastadas (D 8)

6) Adulto con alas dobladas (D1)



Fig. B.1 Fotografía del oscilador de barrido modelo 8620C-módulo RF 86250A

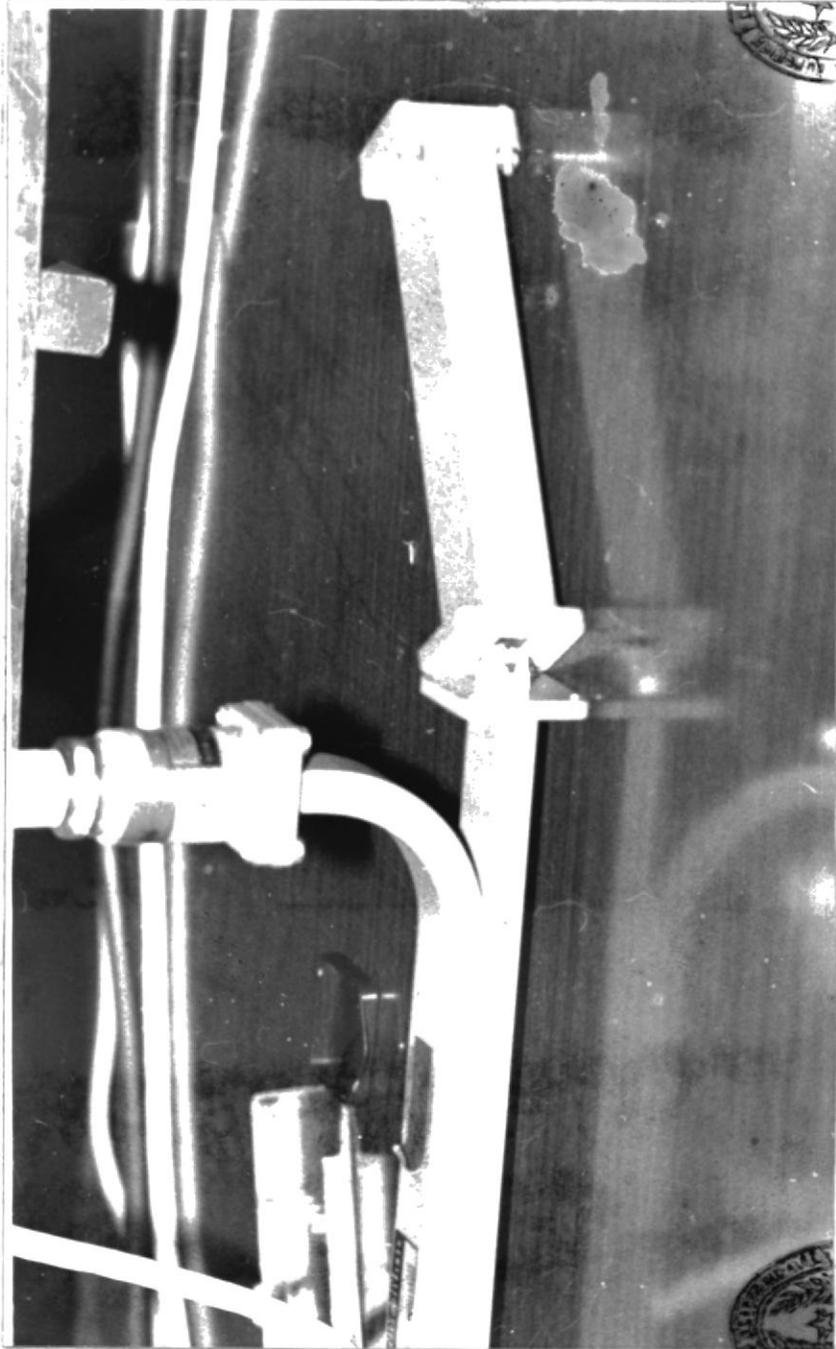


Fig. B.2 Fotografía del acoplador direccional-pupas-terminación



BIBLIOTECA



BIBLIOTECA



BIBLIOTECA

1957-1958

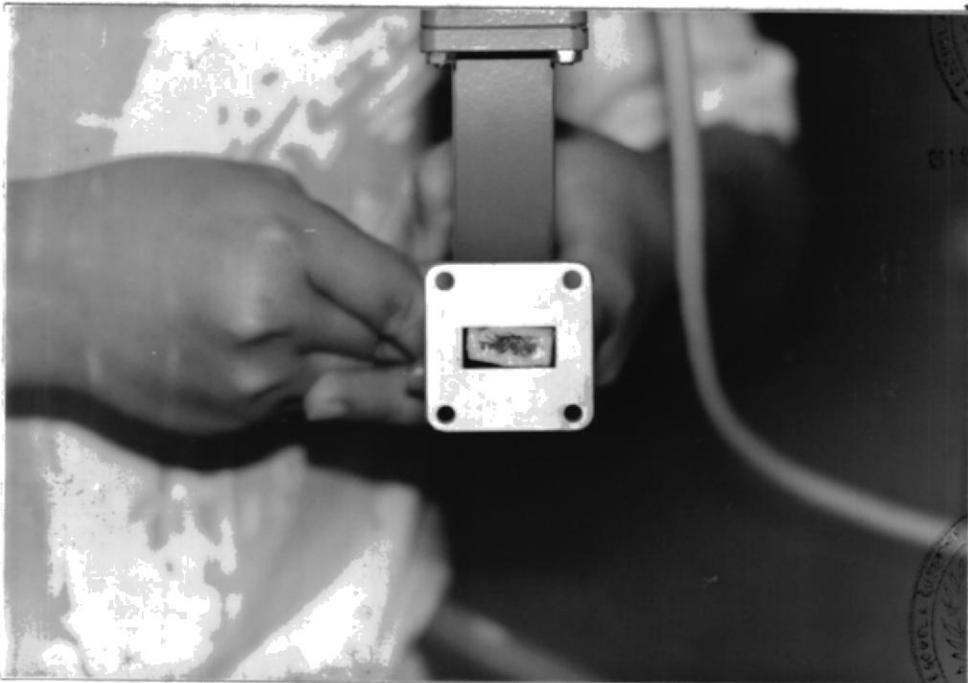


Fig. B.3 Fotografía de las pupas colocadas en el interior de la guía de onda

100

Fig. 10. Photographs of the paper placed on the interior of  
the tube on one side.

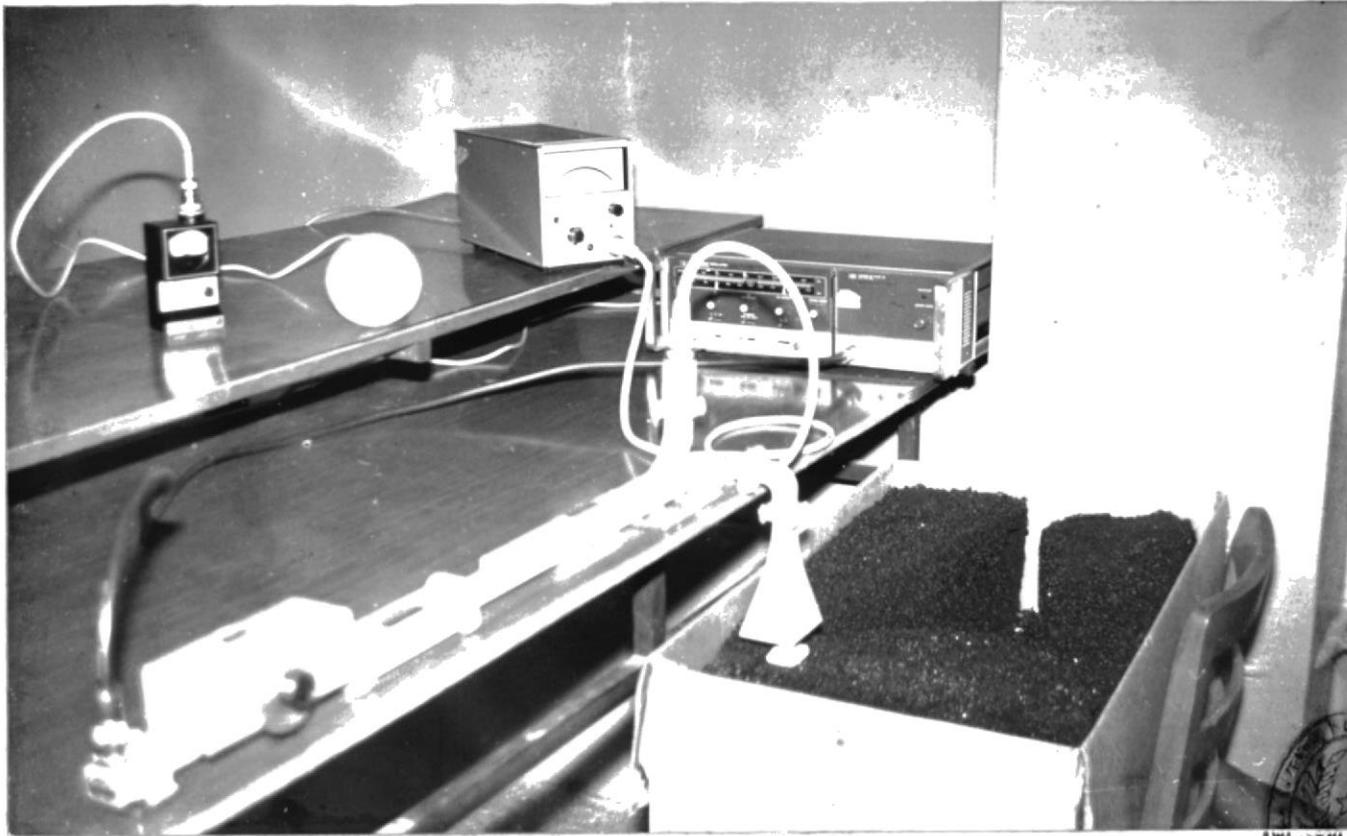
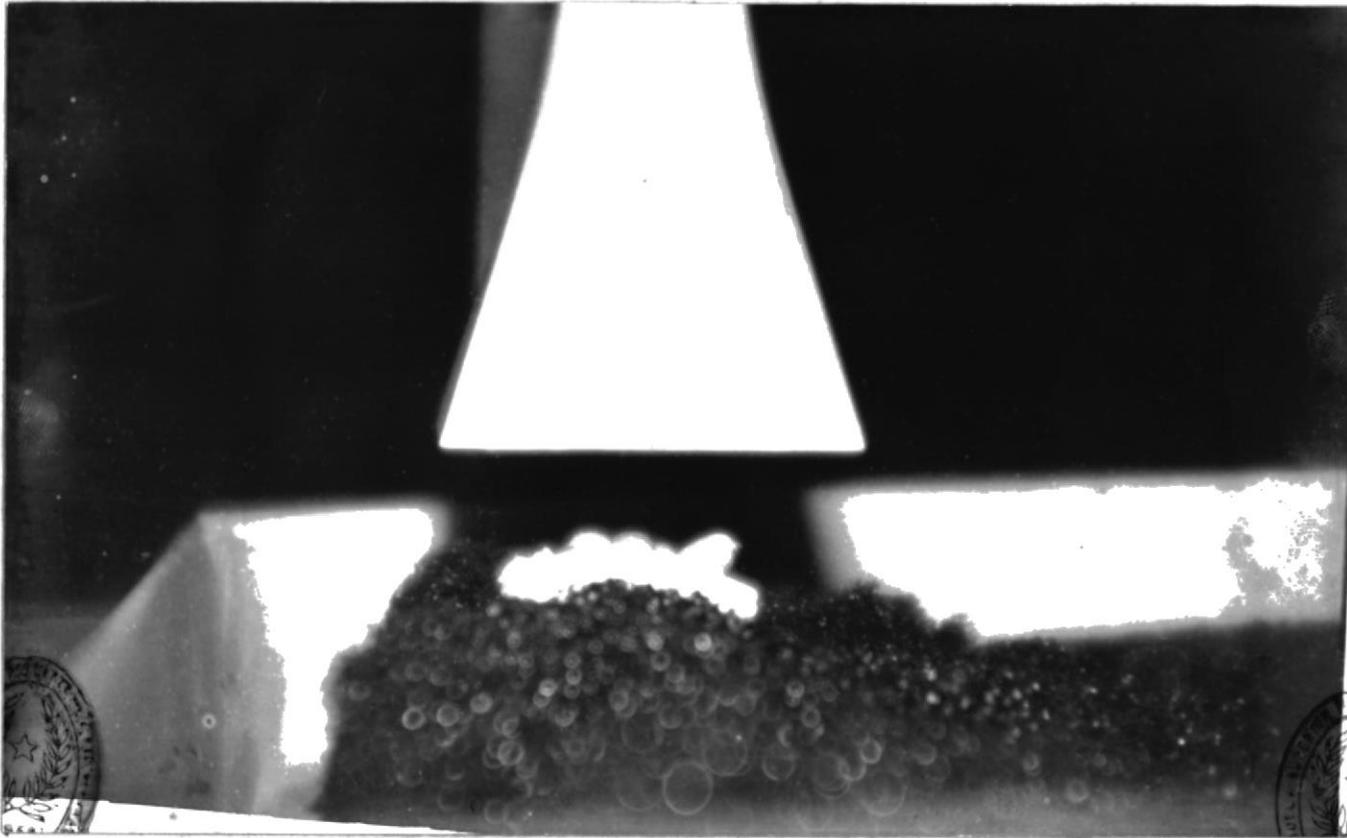


Fig. B.4 Fotografía del circuito de microondas para irradiación a espacio libre



BIBLIOTECA

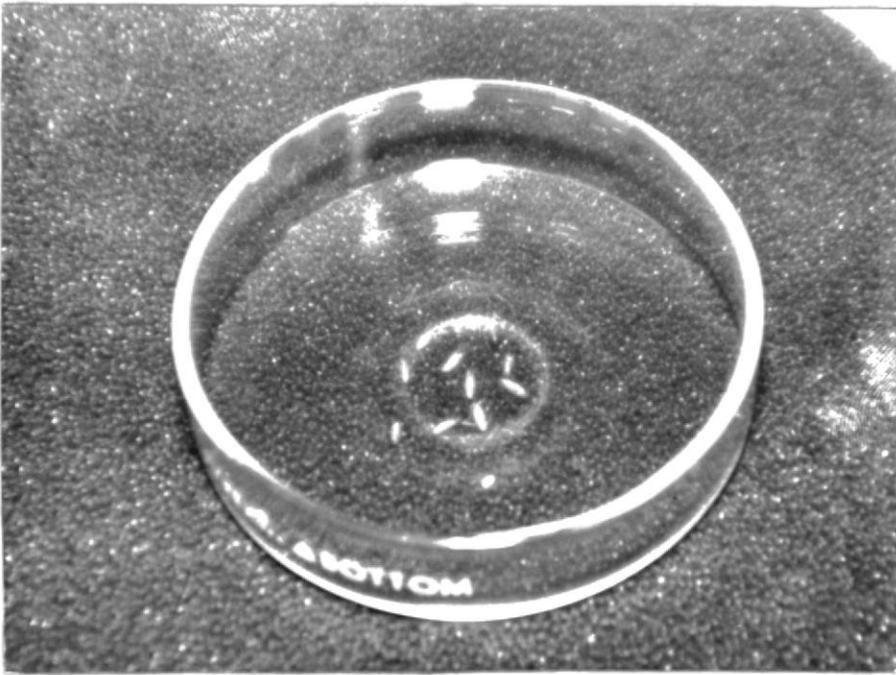




BIBLIOTECA



Fig. B.5 Fotografía que incluye antena bocina/anfitrión-pupas/absorbedor de microondas



**Fig. B.6** Pupas de *Sitotroga Cerealella* en una caja pìrex, previas a ser irradiadas

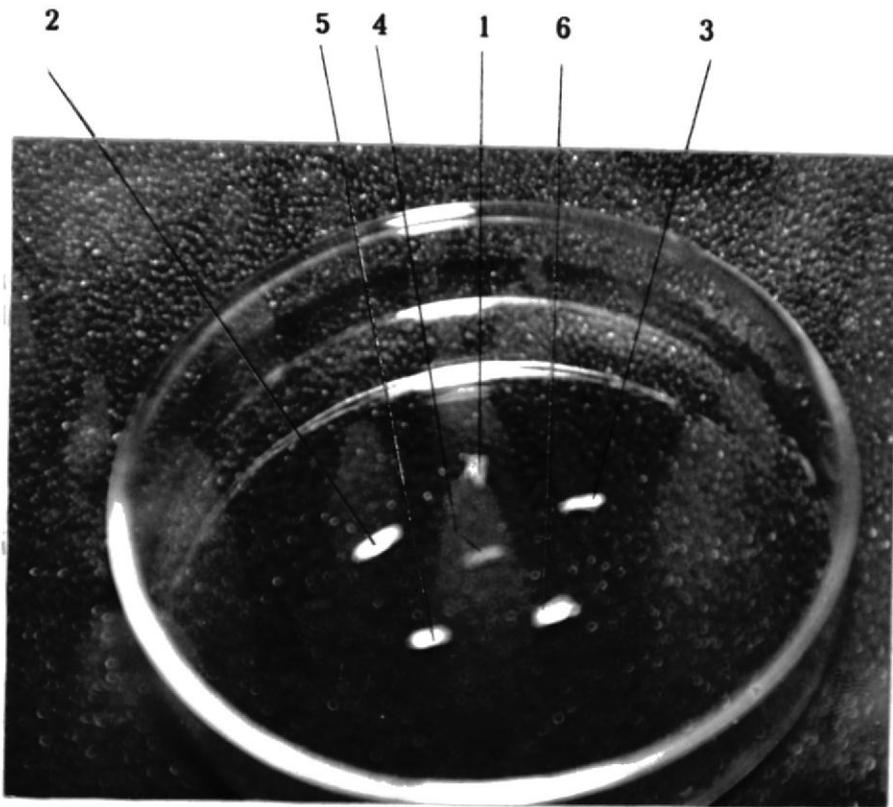


Fig. B.7 Fotografía de adultos de Sitotroga Cerealella en los que se observan deformaciones