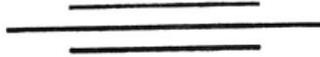




D-9928

T
621.3813
5311

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD**



“Desarrollo de un Aplicador de Microondas de Apertura Circular para Irradiación Biomédica”

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD

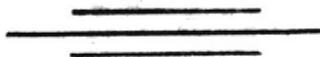
Especialización: ELECTRONICA

Presentada por:

Carlos A. Sánchez Barbáez

Guayaquil - Ecuador

1990

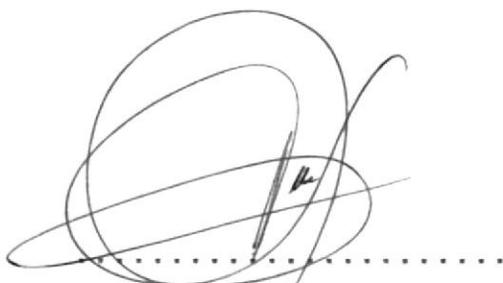


AGRADECIMIENTO

Al ING. CARLOS BECERRA E.
Director de Tesis, por su
ayuda y colaboración para
la realización de este
trabajo.

DEDICATORIA

- A MIS PADRES
- A MIS HERMANOS



ING. CARLOS BECERRA E.

Director de Tesis



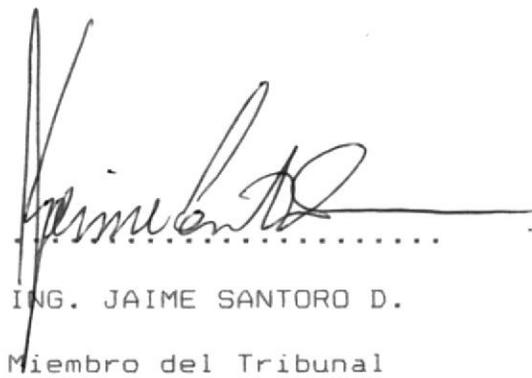
ING. JORGE FLORES M.

Presidente del Tribunal



ING. MIGUEL YAPUR A.

Miembro del Tribunal



ING. JAIME SANTORO D.

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).



.....

Carlos A. Sánchez Narvárez

RESUMEN

El trabajo expone el estudio de discontinuidades transversales en guías de onda a través del Análisis Modal, dirigido al diseño de aplicadores de microondas de apertura circular unielementarios, con la finalidad de poner a consideración su posterior utilización en Biomedicina en el tratamiento de tejidos cancerosos con Microondas.

Este método soluciona la interfaz que resulta en la unión de dos guías diferentes, la de mayor diámetro representa al tejido biológico de constitución uniforme y la menor al aplicador, de tal forma que permite realizar el cálculo exacto de los parámetros del sistema utilizando la Teoría de la Matriz Generalizada de Dispersión.

Para cumplir este objetivo se ha implementado un programa de computación en FORTRAN acondicionado para que opere en el sistema IBM 4341 del Centro de Servicios Computacionales de la ESPOL.

El diseño de varias alternativas de aplicadores fué llevado a cabo sobre dos clases de tejidos biológicos: músculo y grasa operando a 2.45 GHz.

INDICE GENERAL

	PAG.
RESUMEN	5
INDICE GENERAL	6
INDICE DE FIGURAS	9
INTRODUCCION	12
CAPITULO I	
BREVE ESTUDIO DE LOS APLICADORES	14
1.1 Introducción	14
1.2 Tipos de Aplicadores	16
1.3 Definición de Parámetros y Características ..	21
1.4 Utilizaciones	23
CAPITULO II	
MATRIZ GENERALIZADA DE DISPERSION	25
2.1 Introducción	25
2.2 Matriz de Dispersión: Definiciones	27
2.3 Ecuaciones Matriciales Generales	33
2.4 Ecuaciones Matriciales para Guiaondas de Apertura Circular	35
CAPITULO III	
DISEÑO DEL PROGRAMA	50
3.1 Generalidades	50

3.2	Especificaciones de Entrada/Salida	51
3.3	Diagramas de Flujo	54
3.4	Listado del Programa	64
CAPITULO IV		
	EJECUCION DEL PROGRAMA	74
4.1	Ejemplo 1 del Diseño de un Aplicador	82
4.1.1	Datos de Entrada	82
4.1.2	Datos de Salida	84
4.2	Ejemplo 2 del Diseño de un Aplicador	96
4.2.1	Datos de Entrada	96
4.2.2	Datos de Salida	98
4.3	Análisis de Resultados	110
CAPITULO V		
	APLICACIONES	112
5.1	Introducción	112
5.2	Usos en Biomedicina: Hipertermia	114
5.2.1	Breve Estudio de los Tejidos Biológicos sometidos a Campos Electromagnéticos	121
5.3	Otras Aplicaciones	126
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
	APENDICES	134
	APENDICE A: FORMULACION DE LA MATRIZ GENERA- LIZADA DE DISPERSION	135

APENDICE B: TABLAS Y FUNCIONES DE BESSEL ...	150
APENDICE C: MANUAL DEL USUARIO	155
BIBLIOGRAFIA	157

INDICE DE FIGURAS

N.-	PAG.
CAPITULO 1	
1.1 Aplicadores Externos Capacitivos	18
1.2 Aplicadores Externos Inductivos	19
1.3 Aplicadores Externos de Apertura Radiante ..	20
CAPITULO 2	
2.1 Matriz de Dispersión para una Red de 2 Puertas. Análisis Monomodal	26
2.2 Modelo del Sistema Aplicador-Tejido. Análisis Modal	28
2.3 Interfaz Aplicador-Tejido. Enfoque Modal ...	29
CAPITULO 3	
3.1 Diagramas de Flujo del Programa	55
CAPITULO 4	
4.1 Magnitud del Coeficiente de Reflexión del Modo Fundamental vs frecuencia. Caso 1.a ...	89
4.2 Magnitud del Coeficiente de Reflexión del Modo Fundamental vs frecuencia. Caso 1.b ...	90
4.3 Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular θ° . Caso 1.b	91

4.4	Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular 45° . Caso 1.b	92
4.5	Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular 90° . Caso 1.b	93
4.6	Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular 135° . Caso 1.b	94
4.7	Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular 180° . Caso 1.b	95
4.8	Magnitud del Coeficiente de Reflexión del Modo Fundamental vs frecuencia. Caso 2.a ...	103
4.9	Magnitud del Coeficiente de Reflexión del Modo Fundamental vs frecuencia. Caso 2.b ...	104
4.10	Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular 0° . Caso 2.a	105
4.11	Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular 45° . Caso 2.a	106
4.12	Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular 90° . Caso 2.a	107
4.13	Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular 135° . Caso 2.a	108
4.14	Magnitud del Campo Eléctrico en el Tejido vs eje Z. Plano Angular 180° . Caso 2.a	109

CAPITULO 5

5.1	Diagrama de Bloques de Sistema Hipertérmico Aplicado al Tratamiento de Tumores	120
-----	---	-----

5.2	Permitividad Dieléctrica de los Tejidos en	
	Dependencia de su contenido de Agua	123
5.3	Tabla de Permitividades y Conductividades	
	de varios tejidos vs frecuencia	124
5.4	Principios Básicos de Tomografía con	
	Microondas, a por Transmisión	
	b por Difracción	129
APENDICE A		
1	Discontinuidad en Guías de Onda y la Matriz	
	de Dispersión Multimodal	136
2	Discontinuidad en Guías de Onda, Solución	
	mediante el Análisis Modal	139

INTRODUCCION

El diseño de aplicadores electromagnéticos y ultrasónicos es objeto de investigación que verdaderamente ha motivado un gran interés entre los científicos a nivel mundial en las últimas décadas, debido a su especial uso clínico en el Tratamiento Hipertérmico de tumores de ubicación localizada.

La necesidad de incurrir en el estudio de los aplicadores de microondas de apertura circular, de utilización en la rama Biomédica, justifica la presentación del tema y su enmarcación en el contexto de una tesis, sobre todo si el objetivo es implementar un programa para la computadora que ayude al ingeniero relacionado con la tarea de diseñar aplicadores.

La metodología que se sigue en la elaboración del trabajo está basada en la aplicación de la Formulación de la Matriz de Dispersión mediante el Análisis Modal al estudio del comportamiento del sistema aplicador-tejido configurado como una discontinuidad entre guías cilíndricas diferentes, una simula al tejido y la otra al aplicador.

La técnica favorece el cálculo exacto de los parámetros electromagnéticos del sistema cuando una de las guías contiene un material de alta atenuación, la de mayores dimensiones debe simular por lo tanto al tejido.

En el Capítulo 1 se discute acerca de conceptos básicos relacionados con el manejo de los aplicadores, su clasificación, y utilidades en forma general.

En el Capítulo 2 se presenta el desarrollo matemático del análisis multimodal y la matriz de dispersión centrándose particularmente en el correspondiente al caso de guías de sección circular.

En el Capítulo 3 se sitúa el programa diseñado abarcando su codificación y diagramas de flujo y las especificaciones de los datos de entrada/salida.

El Capítulo 4 reúne los resultados de la ejecución del programa para dos clases de tejido irradiado: grasa y músculo.

El Capítulo 5 finaliza tratando sobre el uso que se le dá a los aplicadores de microondas en el tratamiento hipertérmico localizado de tejidos cancerosos, y mencionando ideas generales sobre otras aplicaciones: la termografía y la tomografía que utilizan microondas.

CAPITULO I

BREVE ESTUDIO SOBRE APLICADORES

Tal vez una primera idea que se tenga acerca del significado de aplicador se vea relacionada con la de algún tipo de antena, pero esta puede ser un tanto errónea en la situación más general, en todo caso el objetivo del presente capítulo es precisamente iniciar al lector en conceptos básicos que giran en torno a los aplicadores como dispositivos de gran utilidad en el área biomédica.

1.1 Introducción

Para empezar, una definición exacta de aplicador no es fácil encontrarla debido a que en la actualidad existe gran variedad de ellos, e incluso se realiza un intenso estudio que conlleve al diseño de otros posiblemente más eficaces, conforme transcurre el tiempo, el único factor común a todos ellos es el benéfico servicio que presta a la ciencia oncológica.

Por el momento se anotará que un **Aplicador** es un elemento pasivo de 2 puertas diseñado para introducir energía no ionizante (Ultrasonido Radiofrecuencia y Microondas) en el interior de un medio que se caracteriza por su alta atenuación y aquel podría ser alguna clase de tejido viviente como la piel, grasa, músculo, tumores, etc.

Previa a la utilización real de los aplicadores en tejidos biológicos, es fundamentalmente importante seguir cronológicamente un ciclo de tareas de alta complejidad, cuya ejecución inmiscuye profesionales de diversas áreas como Física, Biología, Ingeniería Medicina, Computación, etc., todas se enmarcan en el campo de la Investigación, entre ellas están:

- Estudio de características eléctricas y térmicas del tejido irradiado, tanto a nivel celular como macroscópico.
- Diseño de aplicadores, y la creación de programas para su efecto, (Diseño Ayudado por Computadora).
- Pruebas sobre modelos físicos que simulan al tejido biológico, conocidos como 'phantoms'.
- Criterios para la adopción de clase de terapia.

El punto central de nuestra labor trata del diseño de aplicadores, mediante la ayuda del computador, y cuando sea necesario se versará sobre otros detalles, especialmente en el capítulo final.

1.2 Tipos de Aplicadores

Inicialmente los aplicadores pueden ser de dos clases, ultrasónicos y electromagnéticos. En la ref. (6) se sugiere una clasificación para los **aplicadores electromagnéticos** acorde a dos maneras:

- Por la frecuencia de trabajo:
 - microondas.
 - radiofrecuencia:
 - de transductor simple.
 - de transductor múltiple.
 - de fuente móvil.
- Por la forma de inducir calor (hipertermia):
 - externos o llamados también no invasivos.
 - internos o invasivos.

En la siguiente página se ubica un cuadro sinóptico que muestra estas últimas agrupaciones.

		capacitivos	
tipos de	externos	inductivos	
aplicadores		radiantes	guias de onda
según la			microstrip
forma de			
inducir calor	internos	intersitiales	
		intracavitarios	

Los aplicadores tipo guíaonda pueden ser agrupados conforme a su disposición geométrica y al número de guías, lo cual el lector fácilmente imagina que hay guías de forma rectangular, circular, etc., y pueden estar compuestas por una o varias subguías, así toma cuerpo el concepto de **Unidad Aplicadora**, para las que poseen dos o más elementos, conocidos como 'arreglos', ellos son dispositivos multipuertas.

Las figs. 1, 2 y 3 dan una idea respecto a la forma física de los aplicadores de utilización externa.

Se **especifica** que en esta tesis se estudiarán los aplicadores externos de microondas de forma cilíndrica unielementarios.

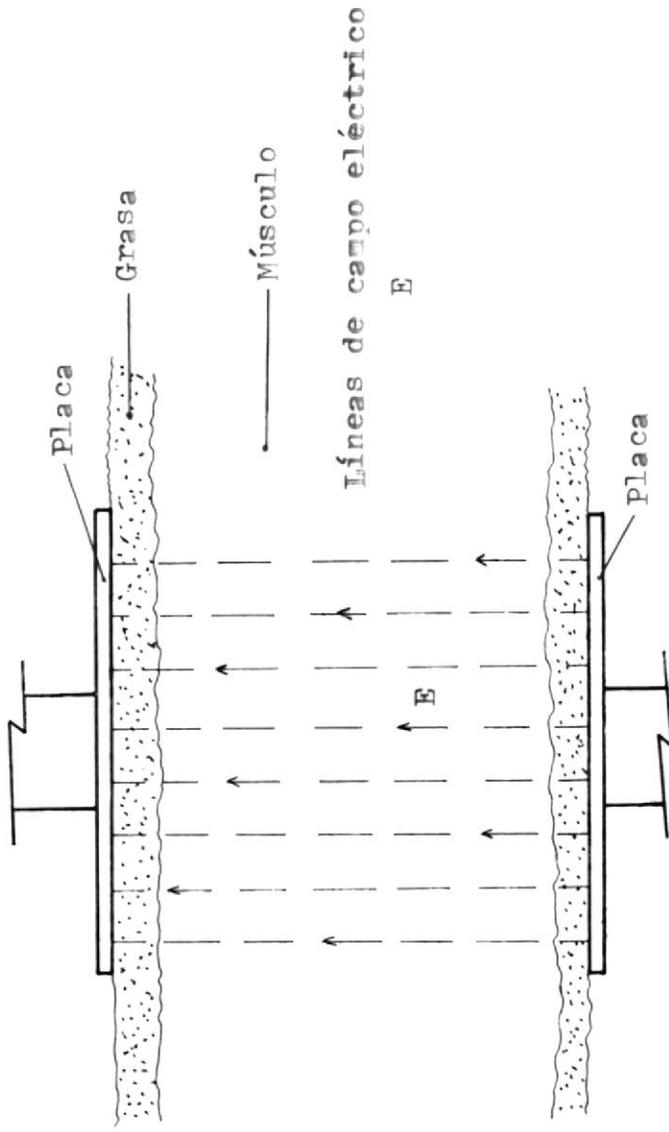
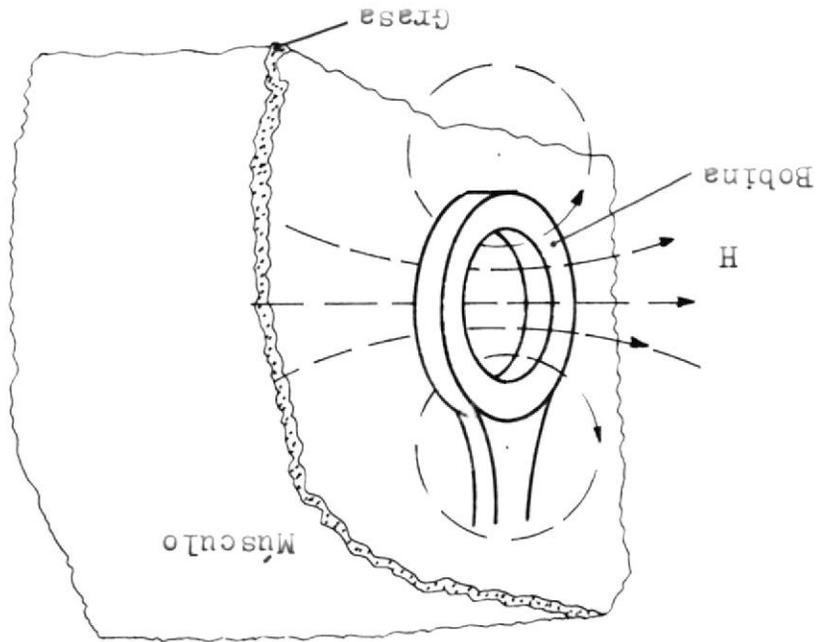


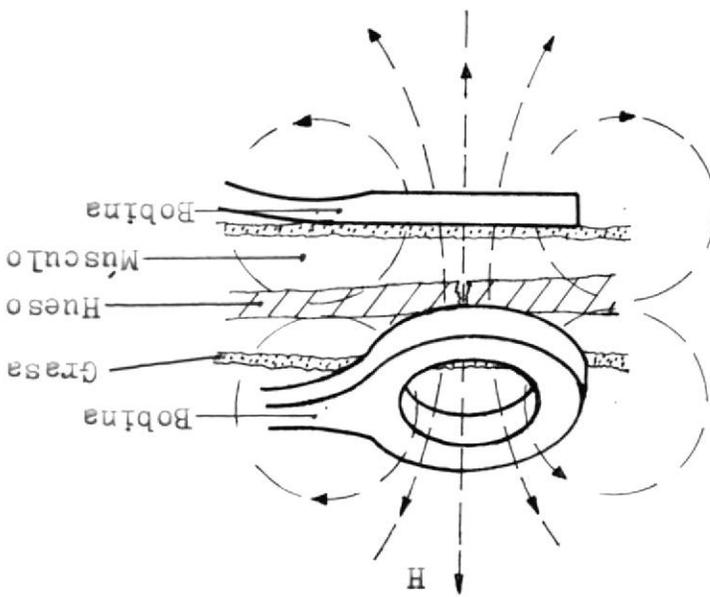
FIG. +1.1 APLICADORES EXTERNOS CAPACITIVOS

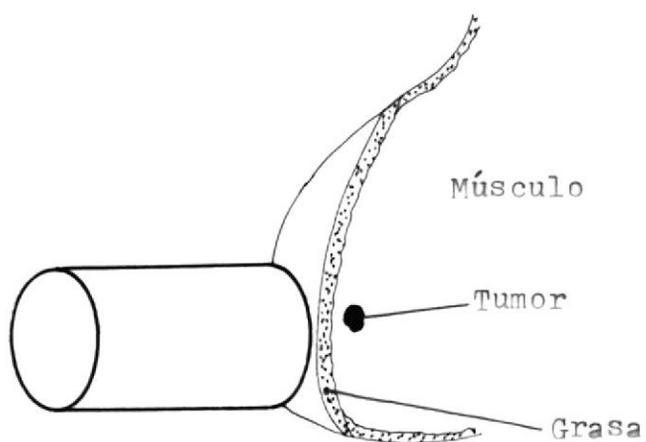
Cheung (6)

FIG. 1.2 APLICADORES EXTERNOS INDUCTIVOS

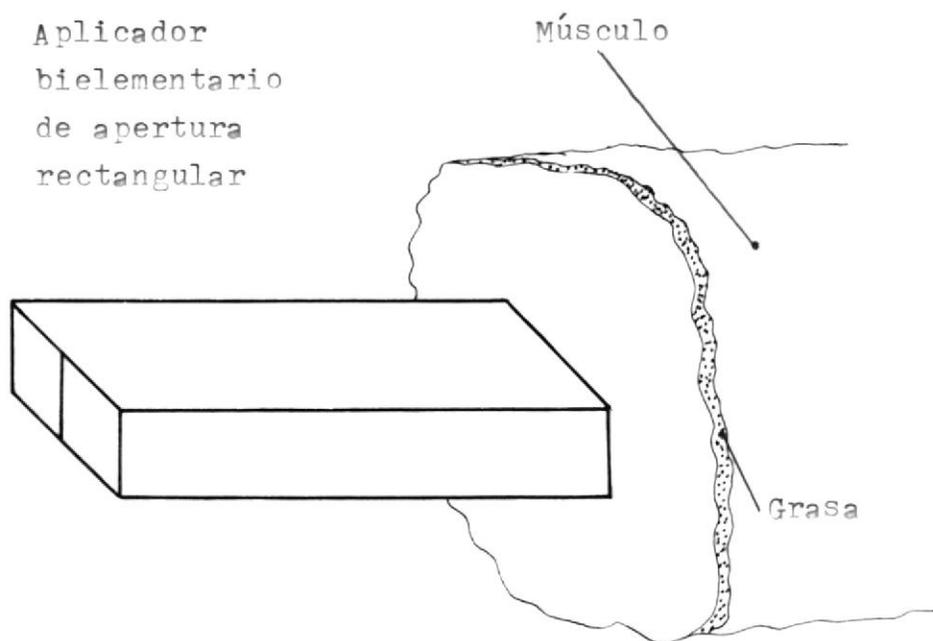


Líneas de campo magnético H





Aplicador
unielementario



Aplicador
bielementario
de apertura
rectangular

FIG. 1.3 APLICADORES EXTERNOS DE APERTURA RADIANTE

1.3 Definición de Parámetros y Características

De forma general existen ciertos datos que están involucrados en el manejo de los aplicadores de microondas: las características, comprenden el conjunto de valores conocidos, propios de un aplicador en particular; los parámetros, variables cuyos valores serán determinados en base a ecuaciones dadas. Más información sobre el tema puede hallarse en (1).

Ya que en nuestro desarrollo analítico se toma en cuenta la existencia de la discontinuidad entre el aplicador y el material biológico, importan también las características y parámetros del tejido.

Para el aplicador:

- Características:

- Forma y dimensiones geométricas: el valor del diámetro, frecuencia de corte, etc.
- Relleno dieléctrico: permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética relativas.
- Material de fabricación del aplicador: define el valor de la atenuación.
- Número de modos considerados en el cálculo.

- **Parámetros:**

- Coeficiente de reflexión en el aplicador, es un indicativo del porcentaje de energía que se refleja cuando en el aplicador se propaga el modo fundamental.

Para el tejido:

- **Características:**

- Forma y dimensiones geométricas del tejido.
- Clase de tejido: permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética relativas.
- Número de modos que intervienen en el cálculo.

- **Parámetros:**

- La Matriz de Dispersión.
- Distribución volumétrica del campo eléctrico.
- Tasa de Absorción Específica.
- Profundidad de penetración.

Los dos primeros se tratan en el capítulo siguiente y los últimos en el capítulo final, por ahora conviene saber que la matriz de dispersión describe el comportamiento del sistema aplicador-tejido, y ante un estímulo o campo electromagnético incidente desde el aplicador corresponderá una respuesta en el tejido.

La tasa de absorción específica indica la cantidad de energía que el tejido recepta, y el otro la distancia que la misma entra en el.

1.4 Utilizaciones

En general, se afirma que en dependencia del uso a someter al aplicador, este debe ser construido muy cuidadosamente, teniéndose que elegir, por ejemplo la clase de material a emplear, el tipo de relleno dielectrico que debe llevar, dimensiones que definirán la frecuencia de operación, etc.

La tarea a efectuarse no es implementar el diseño físico del aplicador, sino su análisis teórico con el auxilio del programa, por lo tanto no se hará énfasis en el tipo de material empleado para su construcción, lo que sí se menciona es que con frecuencia existen consideraciones de peso y tamaño a tomar en cuenta para su fabricación, lo cual hace que los aplicadores puedan ser de Bronce Aluminio u otras aleaciones livianas.

En cuanto se refiere al relleno dielectrico que se puede emplear, el rango de valores de la constante dielectrica relativa a disposición comercial va desde 1 a 150, así se señala en (6).

Lo principal para el diseño es conocer la clase de tejido a tratar, las dimensiones del mismo, que tan accesible es la región considerada, etc.

Ejemplo de ello es el empleo de aplicadores externos cuando el tejido a someter está ubicada en una región cercana a la periferia del cuerpo digamos un tumor canceroso en las extremidades o en el seno. Cuando el sector en cuestión se localiza en una parte inaccesible es mejor trabajar con los aplicadores internos, con lo cual se logra que el calor sea depositado directamente en el tumor, es de suponer que en el manejo de aquellos interviene la Cirugía.

A continuación se lista varias utilizaciones de los aplicadores en el campo de la Biomedicina:

- Tratamiento hipertermico del cáncer.
- crecimiento y curación de tejidos óseos.
- detección del movimiento corporal.
- imaginamiento de tejidos.(baja resolución).

CAPITULO II

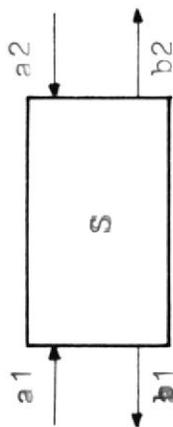
MATRIZ GENERALIZADA DE DISPERSION

Es muy importante lograr predecir el comportamiento del sistema aplicador-tejido, pues el primordialmente influye en el diseño de todo aplicador, esto puede efectuarse trabajando con la Matriz de Dispersión, a estudiarse en el presente capítulo.

En la unión de guías de onda diferentes se forma una interfaz que puede ser considerada como una simple red de 2 puertas y resuelta aplicando una técnica exacta propuesta por Wexler (12), conocida como **Análisis Modal** teoría sobre la que se fundamenta la Formulación de la Matriz de Dispersión Multimodal, vista en el Apéndice A.

2.1 Introducción

La teoría convencional sobre Microondas define a la matriz de dispersión (Parámetros S), para un dispositivo de 2 puertas como la relación entre lo reflejado i lo incidente, consultar (7) y observar la fig. 2.1. Pero en ese estudio hay 2 desventajas:



$$B = S \times A$$

$$\begin{bmatrix} b1 \\ b2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s11 & s12 \\ s21 & s22 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a1 \\ a2 \end{bmatrix}$$

B = Matriz Voltaje reflejado
 S = Matriz de Dispersión (Monomodal)
 A = Matriz Voltaje incidente

s11=coeficiente de reflexión de pta. 1 a pta. 1
 s22=coeficiente de reflexión de pta. 2 a pta. 2
 s21=coeficiente de transmis. de pta. 1 a pta. 2
 s12=coeficiente de transmis. de pta. 2 a pta. 1

b1=voltaje reflejado en pta. 1
 b2=voltaje reflejado en pta. 2
 a1=voltaje incidente en pta. 1
 a2=voltaje incidente en pta. 2

FIG. 2.1 MATRIZ DE DISPERSION PARA UNA RED DE 2 PUERTAS. ANALISIS MONOMODAL

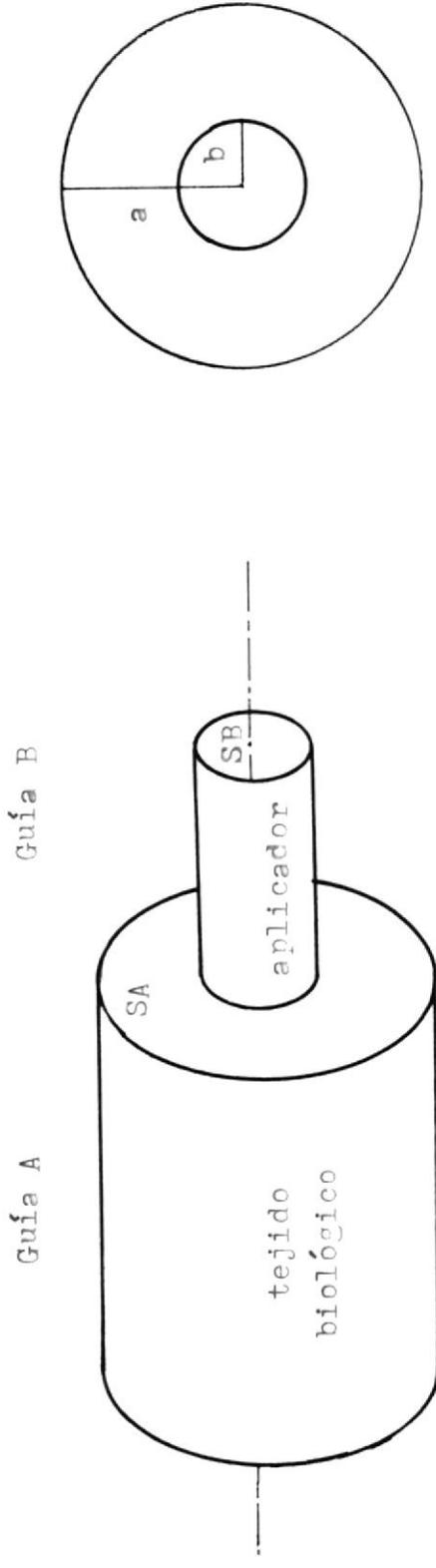
- con el fin de facilitar su aprendizaje se emplean ondas de voltaje i corriente que físicamente no existen en las guías de onda.
- en su desarrollo toma en cuenta un sólo modo de propagación, es decir, es un análisis monomodal.

El trabajo realizado en esta tesis, supera estos inconvenientes, y sería una magnífica herramienta que brinde exactitud y rapidez en el cálculo, al ingeniero cuyo objetivo sea diseñar aplicadores de microondas de sección transversal circular.

2.2 Matriz de Dispersión: definiciones

La configuración del sistema aplicador-tejido se ilustra en la fig. 2.2 y 2.3, que muestran la discontinuidad entre las guías cilíndricas de ejes concéntricos, la de menor diámetro representa al aplicador, y la otra al tejido, (una guía imaginaria que contiene al material biológico).

El método multimodal considera al campo electromagnético a cualquier lado de la unión, como la suma vectorial de los campos incidentes y reflejados de todos los modos, (propagantes y/o evanescentes) existentes, como lo expresan las ecu. 2.1, 2.2 para $z < 0$ y las ecu. 2.3 y 2.4, para $z > 0$.



Guía A Guía B

FIG. 2.2 MODELO DEL SISTEMA APLICADOR-TEJIDO. ANALISIS MODAL

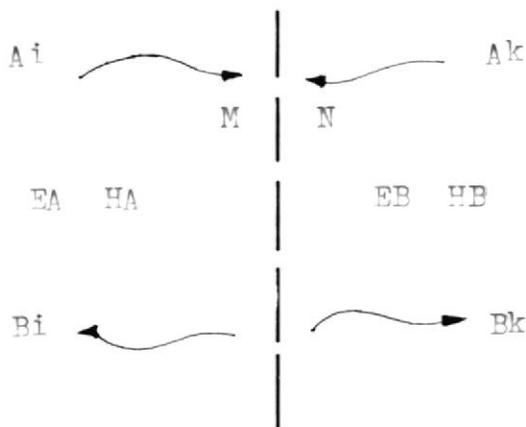
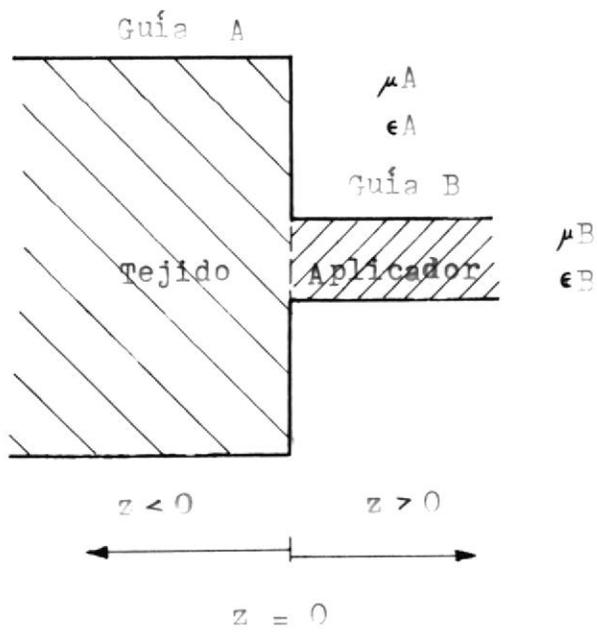


FIG. 2.3 INTERFAZ APLICADOR-TEJIDO. ENFOQUE MODAL

$$EA = \sum_{\pm=1}^M (A_{\pm} * \exp(-j\beta_{\pm} * z) + B_{\pm} * \exp(j\beta_{\pm} * z)) * e_{\pm} \quad (2.1)$$

$$HA = \sum_{\pm=1}^M (A_{\pm} * \exp(-j\beta_{\pm} * z) - B_{\pm} * \exp(j\beta_{\pm} * z)) * h_{\pm} \quad (2.2)$$

$$EB = \sum_{\kappa=1}^N (A_{\kappa} * \exp(j\beta_{\kappa} * z) + B_{\kappa} * \exp(-j\beta_{\kappa} * z)) * e_{\kappa} \quad (2.3)$$

$$HB = \sum_{\kappa=1}^N (-A_{\kappa} * \exp(j\beta_{\kappa} * z) + B_{\kappa} * \exp(-j\beta_{\kappa} * z)) * h_{\kappa} \quad (2.4)$$

Las mismas que deben cumplir las condiciones de salto en $z=0$, por lo tanto:

$$EA = EB \Big|_{z=0} \quad (2.5a)$$

$$HA = HB \Big|_{z=0} \quad (2.5b)$$

Para:	Guía A	Guía B
const.de propagación esimo modo	β_{\pm}	β_{κ}
vector campo electrico total	EA	EB
vector campo magnetico total	HA	HB
esimo elem. de matriz incidente	A_{\pm}	A_{κ}
esimo elem. de matriz reflejada	B_{\pm}	B_{κ}
número de modos	M	N

Además los vectores de campo eléctrico y magnético e_i , h_i son las componentes transversales de campo para el modo i en la guía A; equivalentemente e_k y h_k para el modo k en la guía B, puesto que en $z=0$ las componentes axiales de los campos se anulan.

El desarrollo completo del análisis multimodal y su simbología para el caso más general se detalla en el **Apendice A**, en todo caso, el proceso matemático da origen a un conjunto de ecuaciones matriciales anotadas en la sección siguiente, que permiten calcular la Matriz de Dispersión Modal dada por:

$$\begin{array}{c} \left\{ \begin{array}{c} B1 \\ B2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{cc} S11 & S12 \\ S21 & S22 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} A1 \\ A2 \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

Donde:

matriz de campos incidentes desde guía A	A1
matriz de campos incidentes desde guía B	A2
matriz de campos reflejados hacia guía A	B1
matriz de campos reflejados hacia guía B	B2
matriz de dispersión de la pta. A a pta. A	S11
matriz de dispersión de la pta. B a pta. A	S12
matriz de dispersión de la pta. A a pta. B	S21
matriz de dispersión de la pta. B a pta. B	S22

Ahora hay que citar dos aspectos referentes a la eficacia del desarrollo modal:

- La **convergencia** de la metodología.

De acuerdo a la ref. (8) para que los resultados del análisis modal sean válidos, la escogencia del número de modos debe guardar cierta relación con la sección transversal de las guías, conforme a:

$$M/N = SA/SB$$

En el caso de estudio, ver fig. 2.2 se tiene:

$$M/N = (a/b)^2 \quad (2.7)$$

- El criterio de **unificación** de modos.

En las ref. (2) y (3) se acota que el número de modos a seleccionar debe contemplar la existencia de modos TE y TM, además mediante alguna alternativa debe poderse escoger con cuál de ellos trabajar para un número dado de modos.

La solución es adoptar algún **algoritmo** que ayude a realizar adecuadamente tal tarea.

El mecanismo utilizado para unificar el número de modos, se basa en la clasificación de modos TE y TM por la frecuencia de corte, dada por la ordenación ascendente de las raíces de la función de Bessel y su primera derivada.

Así, se tiene que para un número específico M de modos, por ejemplo i corresponderá un par de subíndices nm, que identificará al modo i del número unificado M de modos en la guía A. Similarmente el subíndice k representará a la pareja de subíndices st, y es el modo k del número unificado N de modos en la guía B.

2.3 Ecuaciones Matriciales Generales

El siguiente paquete de expresiones son tomadas del Apendice A, donde puede encontrarse la demostración de cada una con detalle.

$$B1 = S11*A1 + S12*A2 \quad (2.8a)$$

$$B2 = S21*A1 + S22*A2 \quad (2.8b)$$

$$S21 = Z*(X*P^{-1} * X^T + Q)^{-1} * X \quad (2.9)$$

$$S11 = P^{-1} * X^T * S21 - I \quad (2.10)$$

$$S_{22} = (X * P^{-1} * X^T + Q)^{-1} * (Q - X * P^{-1} * X^T) \quad (2.11)$$

$$S_{12} = P^{-1} * X^T * (S_{22} + I) \quad (2.12)$$

$$P = \int_{\Sigma_A} \mathbf{e}_i \times \mathbf{h}_i \cdot d\mathbf{s} \quad (2.13)$$

$$Q = \int_{\Sigma_B} \mathbf{e}_k \times \mathbf{h}_k \cdot d\mathbf{s} \quad (2.14)$$

$$X = \int_{\Sigma_B} \mathbf{e}_k \times \mathbf{h}_k \cdot d\mathbf{s} \quad (2.15)$$

Las dimensiones de las matrices son:

$$A_1, B_1 = M * 1$$

$$A_2, B_2 = N * 1$$

$$S_{11}, P = M * M$$

$$S_{22}, Q = N * N$$

$$S_{21}, X = N * M$$

$$S_{12} = M * N$$

2.4 Ecuaciones para Aplicadores de Apertura Circular

Conforme a las expresiones generales presentadas en la sección anterior, se deduce que las matrices P , Q y X dependen básicamente de la geometría de las guías, así lo manifiestan las integrales, por lo cual en esta sección haremos el desarrollo vectorial necesario para hallar las ecuaciones finales de X , P y Q , desde luego, trabajando en coordenadas cilíndricas.

Iniciamos reescribiendo las ecuaciones de campo tomadas de la ref. (7), en las que separando el factor exponencial ya contemplado en las ecu. desde la 2.1 hasta 2.4 y además cambiando los subíndices nm , con i , entonces resultan:

- Para el modo TE

$$e_{r_i} = \frac{-j * n * \beta_i * Z_{h_i}}{r * K_{c_i}^2} * J_n(p_i' * r/a) * \cos(n * \phi)$$

$$e_{\phi_i} = \frac{j * \beta_i * p_i' * Z_{h_i}}{a * K_{c_i}^2} * J_n'(p_i' * r/a) * \sin(n * \phi)$$

$$e_{z_i} = 0$$

$$hr_z = -e\phi_z / Zh_z$$

$$h\phi_z = er_z / Zh_z$$

$$hz_z = J_n(p_z' * r/a) * \text{sen}(n*\phi)$$

Mediante la relación de la ecu. 2.16 se asume que magnitud del campo angular es unitaria y las expresiones quedan:

$$j*\beta_z*p_z'*Zh_z/(a*Kc_z^2) = |e\phi_z| = 1 \quad (2.16)$$

$$er_z = \frac{-a*n}{r*p_z'} * J_n(p_z'*r/a)*\cos(n*\phi) \quad (2.17)$$

$$e\phi_z = J_n'(p_z'*r/a)*\text{sen}(n*\phi) \quad (2.18)$$

$$ez_z = 0 \quad (2.19)$$

$$hr_z = -J_n'(p_z'*r/a)*\text{sen}(n*\phi)/Zh_z \quad (2.20)$$

$$h\phi_z = \frac{-a*n}{r*p_z'*Zh_z} * J_n(p_z'*r/a)*\cos(n*\phi) \quad (2.21)$$

$$hz_z = \frac{-j*p_z'}{a*\tilde{z}_z*Zh_z} * J_n(p_z'*r/a)*\text{sen}(n*\phi) \quad (2.22)$$

Donde Z_{hi} es la impedancia de onda para el modo TE, p_i' la raíz de la primera derivada de la función de Bessel J_n' y β_i es la constante de propagación, del i ésimo número M de modo en la guía A .

- Para el modo TM

$$e_{r_i} = \frac{-j\beta_i p_i}{a K_{c_i}^2} * J_n'(p_i r/a) * \text{sen}(n\phi)$$

$$e_{\phi_i} = \frac{-j n \beta_i}{r K_{c_i}^2} * J_n(p_i r/a) * \text{cos}(n\phi)$$

$$e_{z_i} = J_n(p_i r/a) * \text{sen}(n\phi)$$

$$h_{r_i} = -e_{\phi_i} / Z_{e_i}$$

$$h_{\phi_i} = e_{r_i} / Z_{e_i}$$

$$h_{z_i} = 0$$

Asignando a la magnitud del campo radial un valor unitario, ecu. 2.25, tenemos:

$$-j\beta_i p_i / (a K_{c_i}^2) = |e_{r_i}| = 1 \quad (2.25)$$

$$e_{r_i} = J_n'(p_i * r/a) * \text{sen}(n * \phi) \quad (2.26)$$

$$e_{\phi_i} = \frac{a * n}{r * p_i} * J_n(p_i * r/a) * \text{cos}(n * \phi) \quad (2.27)$$

$$e_{z_i} = \frac{j * p_i}{a * \beta_i} * J_n(p_i * r/a) * \text{sen}(n * \phi) \quad (2.28)$$

$$h_{r_i} = \frac{-a * n}{r * p_i * Z_{e_i}} * J_n(p_i * r/a) * \text{cos}(n * \phi) \quad (2.29)$$

$$h_{\phi_i} = J_n'(p_i * r/a) * \text{sen}(n * \phi) / Z_{e_i} \quad (2.30)$$

$$h_{z_i} = 0 \quad (2.31)$$

Donde Z_{e_i} es la impedancia de onda para el modo TM, p_i la raíz de la función de Bessel J_n y β_i es la constante de propagación, pertenecientes a un número i de modos unificados M en la guía A .

Por otra parte las componentes vectoriales de campo son:

$$e_{r_i} = e_{r_i} \hat{r} \quad (2.23a)$$

$$e_{\phi_i} = e_{\phi_i} \hat{\phi} \quad (2.23b)$$

$$e_{z_i} = e_{z_i} z \quad (2.23c)$$

$$h_{r_i} = h_{r_i} r \quad (2.24a)$$

$$h_{\phi_i} = h_{\phi_i} \phi \quad (2.24b)$$

$$h_{z_i} = h_{z_i} z \quad (2.24c)$$

Y las componentes transversales (en $z=0$) del campo son:

$$e_i = e_{r_i} + e_{\phi_i} \quad (2.34)$$

$$h_i = h_{r_i} + h_{\phi_i} \quad (2.35)$$

Deducción de la Matriz P

Si se reemplaza las ecu. 2.34 y 2.35 en la 2.13 y resolviendo vectorialmente se obtiene la 2.36.

$$P_i = \int_{SA} e_{r_i} * h_{\phi_i} * r * dr * d\phi + \int_{SA} e_{\phi_i} * h_{r_i} * r * dr * d\phi \quad (2.36)$$

Donde P_i es una matriz $M \times 1$ que contiene los elementos de la diagonal principal de la matriz P de dimensión $M \times M$.

- Modo TE:

Reemplazando la 2.17 y 2.21 en el primer sumando de la 2.36, y luego de reemplazar la 2.18 y la 2.20 en el segundo sumando de la misma 2.36 se llega a las ecu. 2.37, 2.37a, y 2.37b.

$$P_z = \frac{1}{2h_z} \frac{a^n}{p_z'} * K1 * \int_0^a [J_n(p_z' * r/a)]^2 dr/r - K2 * \int_0^a [J_n'(p_z' * r/a)]^2 r * dr \quad (2.37)$$

Y los valores de las constantes K1 y K2 son:

$$K1 = \int_0^{2\pi} [\cos(n * \phi)]^2 d\phi = \begin{matrix} 2\pi & n=0 \\ \pi & \text{si } n \neq 0 \end{matrix} \quad (2.37a)$$

$$K2 = \int_0^{2\pi} [\sen(n * \phi)]^2 d\phi = \begin{matrix} 0 & n=0 \\ \pi & \text{si } n \neq 0 \end{matrix} \quad (2.37b)$$

- Modo TM:

Reemplazando la ecu. 2.26 y 2.30 en el primer sumando de la 2.36, y luego las 2.27 y 2.29 en el segundo sumando de la misma 2.36 se obtiene a la ecu. 2.38.

$$P_i = \frac{-1}{Z e_i} \left[\left(\frac{a \cdot n}{p_i} \right)^2 * K1 * \int_0^a [J_n(p_i \cdot r/a)]^2 dr/r - K2 * \int_0^a [J_n'(p_i \cdot r/a)]^2 r \cdot dr \right] \quad (2.38)$$

Para K1 y K2 dados por las ecu. 2.37a y 2.37b.

Deducción de la Matriz Q

Si comparamos la ecu. 2.13 con la 2.14 y hacemos una **adecuación** de la guía A a la B, (que responde a cambios de variable indicados abajo) no es difícil demostrar las expresiones para los modos TE y TM haciendo:

	guía A	cambiar	guía B
- el índice modal	i	con	k
- el radio	a	con	b
- el factor modal	n	con	s

- Modo TE:

$$Q_k = \frac{1}{Z h_k} \left[\left(\frac{b \cdot s}{p_k'} \right)^2 * K1 * \int_0^b [J_s(p_k' \cdot r/b)]^2 dr/r - K2 * \int_0^b [J_s'(p_k' \cdot r/b)]^2 r \cdot dr \right] \quad (2.39)$$

Donde Q_k es una matriz $N \times 1$ que contiene los elementos de la diagonal principal de Q ($N \times N$).

- Modo TM:

$$Q_k = \frac{-1}{Ze_k} \left[\left(\frac{b*s}{p_k} \right)^2 * K1 * \int_0^b [J_0(p_k*r/b)]^2 dr/r - K2 * \int_0^b [J_0'(p_k*r/b)]^2 r*dr \right] \quad (2.40)$$

Con $K1$ y $K2$ dados por las ecu. 2.37a y 2.37b.

Deducción de la Matriz X

Si se hace la adecuación respectiva en la ecu. 2.34 (en adelante **adecuar** significará efectuar varios cambios de variables en las ecuaciones citadas, de manera similar al caso de la matriz Q) y se usa la ecu. 2.35, para reemplazarlas en la 2.15 se llega a la ecu. 2.41.

$$X = \int_{\Omega} e_{r_k} * h_{\theta_1} * r * dr * d\theta + \int_{\Omega} e_{\theta_k} * h_{r_1} * r * dr * d\theta \quad (2.41)$$

Puesto que el índice i para la guía A representa la pareja de subíndices nm , y k para la guía B los

subíndices st, ellos pueden o no ser diferentes, es decir coincidir o no tanto en valor ($n=s$, $m=t$) como en el modo de propagación (TE, TM), por lo cual, se originan 4 casos: TE-TE, TE-TM, TM-TE, TM-TM.

- Combinación TE-TE:

Realizando igual adecuación en la ecu. 2.17, y usando la 2.21, para reemplazarlas en el primer sumando de la 2.41; luego adecuando la ecu. 2.18 y empleando la 2.20, se reemplazan en el segundo sumando de la 2.41, resulta la ecu. 2.42, 2.42a y 2.42b.

$$X = \frac{1}{Z h_z} \left[\frac{a*b*n*s}{p_s' * p_k'} * K3 * \int_0^b J_m(p_k' * r/b) * J_n(p_s' * r/a) dr/r \right. \\ \left. - K4 * \int_0^b J_m'(p_k' * r/b) * J_n'(p_s' * r/a) r * dr \right] \quad (2.42)$$

Las constantes están dadas por:

$$K3 = \int_0^{2\pi} \cos(n*\phi) * \cos(n*\phi) d\phi = \begin{matrix} K1 & \text{si } n=s \\ 0 & \text{si } n \neq s \end{matrix} \quad (2.42a)$$

$$K4 = \int_0^{2\pi} \sen(n*\phi) * \sen(n*\phi) d\phi = \begin{matrix} K2 & \text{si } n=s \\ 0 & \text{si } n \neq s \end{matrix} \quad (2.42b)$$

Y los valores de K1 y K2 están en 2.37a y 2.37b.

- Combinación TE-TM:

La ecu. 2.17 ya adecuada, utilizada con la 2.30 se reemplazan en el primer sumando de la 2.41 además usando la 2.18 ya adecuada, y la 2.29 para reemplazarlas en el segundo sumando de la 2.41 se obtienen las ecu. 2.43, 2.43a y 2.43b.

$$X = \frac{-1}{Z e_1} \left[\frac{b*s}{p_k'} * K5 * \int_0^b J_{\theta}(p_k' * r/b) * J_n'(p_1 * r/a) dr \right. \\ \left. + \frac{a*n}{p_1} * K6 * \int_0^b J_{\theta}'(p_k' * r/b) * J_n(p_1 * r/a) dr \right] \quad (2.43)$$

Donde los valores de las constantes K5 y K6 son los siguientes:

$$K5 = \int_0^{2\pi} \text{sen}(n*\phi) * \cos(s*\phi) d\phi = \begin{matrix} 1/4n & n=s \neq 0 \\ 0 & \text{si } n \neq s \end{matrix} \quad (2.43a)$$

$$K6 = \int_0^{2\pi} \text{sen}(s*\phi) * \cos(n*\phi) d\phi = \begin{matrix} 1/4n & n=s \neq 0 \\ 0 & \text{si } n \neq s \end{matrix} \quad (2.43b)$$

- Combinación TM-TE:

Adecuando la ecu. 2.27, y multiplicándola con la 2.20 se resuelve el primer sumando de la 2.41; de igual forma adecuando la 2.26, y usando la 2.21 para reemplazarlas en el segundo sumando de la 2.41, finalmente se llega a la ecu. 2.44.

$$X = \frac{-1}{Z_{h_1}} \left[\frac{a*n}{p_1'} * K_6 * \int_0^b J_{\theta}'(p_k*r/b) * J_n(p_1'*r/a) dr + \frac{b*s}{p_k} * K_5 * \int_0^b J_{\theta}(p_k*r/b) * J_n'(p_1'*r/a) dr \right] \quad (2.44)$$

Y las constantes K5, K6 son dadas por 2.43a y 2.43b.

- Combinación TM-TM:

con la ecu. 2.26 adecuada, y empleando la 2.30 se reemplazan en el primer sumando de la 2.41, luego si se adecúa la 2.27, y se usa la 2.29, para reemplazarlas en el segundo sumando de la 2.41 resulta la ecu. 2.45.

$$X = \frac{-1}{Z_{e_1}} \left[\frac{a*b*n*s}{p_1 * p_k} * K_3 * \int_0^b J_{\theta}(p_k*r/b) * J_n(p_1*r/a) dr/r - K_4 * \int_0^b J_{\theta}'(p_k*r/b) * J_n'(p_1*r/a) r * dr \right] \quad (2.42)$$

Para K_3 , K_4 están dadas por las ecu.2.42a y 2.42b, respectivamente.

Por otro lado, las ecuaciones de impedancia de onda para el i ésimo modo en la guía A son anotadas a continuación:

- Modo TE:

$$Z_{h_i} = \frac{120\pi * (\mu_{Ar} / \epsilon_{Ar})^{1/2}}{\{1 - [150 * p_i' / (\pi * a * f_o * (\mu_{Ar} * \epsilon_{Ar})^{1/2})]^2\}^{1/2}} \quad (2.46a)$$

- Modo TM:

$$Z_{e_i} = 120\pi * (\mu_{Ar} / \epsilon_{Ar})^{1/2} * \{1 - [150 * p_i / (\pi * a * f_o * (\mu_{Ar} * \epsilon_{Ar})^{1/2})]^2\}^{1/2} \quad (2.46b)$$

Donde f_o es la frecuencia de operación del sistema ϵ_{Ar} y μ_{Ar} , la permitividad y la permeabilidad relativas en el tejido, ecuaciones que pueden ser adecuados (cambiar variables) para el aplicador.

Cálculo del Campo Electrico en el tejido

El objetivo es determinar la distribución del campo en el interior del tejido, y hay que partir realizando las siguientes asunciones:

- La matriz de campo incidente desde el aplicador hacia la unión, A_2 tiene sólo una componente diferente de cero y es la magnitud unitaria del campo para el modo fundamental TE₁₁, con lo cual se asegura que existe sólo dicho modo propagándose en el aplicador, cuya frecuencia de corte es:

$$f_{c_{TE_{11}}} = \frac{150 * (\rho k' = 1.84)}{\pi * b * (\mu_{Br} * \epsilon_{Br})^{1/2}} \quad (2.47)$$

- La matriz de campo incidente desde el tejido hacia la unión, A_1 es nula, la fórmula del campo total en el interior del tejido, y de la matriz de amplitudes reflejadas desde la unión hacia el tejido quedan:

$$EA = \sum_{i=1}^M B_i * \exp(j\beta_i * z)) * e_i \quad z < 0$$

$$B_1 = S_{12} * A_2$$

Recordando que el vector e_i representa cada uno de las componentes vectoriales de campo dadas por el conjunto de ecu. 2.23a, 2.23b y 2.23c, es relativamente fácil obtener:

$$E_{Ar} = \sum_{i=1}^M B_i \exp(j\beta_i z) e_{ri} \quad z < 0 \quad (2.48a)$$

$$E_{A\phi} = \sum_{i=1}^M B_i \exp(j\beta_i z) e_{\phi i} \quad z < 0 \quad (2.48b)$$

$$E_{Az} = \sum_{i=1}^M B_i \exp(j\beta_i z) e_{zi} \quad z < 0 \quad (2.48c)$$

Note que e_{ri} , $e_{\phi i}$ y e_{zi} son las ecu. 2.17 a 2.19 para los modos TE, y las ecu. 2.26 a 2.28 para los modos TM. La constante de propagación del i ésimo modo se determina mediante:

$$\beta_i = (k_0^2 - k_{c_i}^2)^{1/2} \quad (2.49a)$$

$$k_0 = 2\pi f_0 (\mu_0 \epsilon_0)^{1/2} = \pi f_0 / 150 \quad (2.49b)$$

$$k_{c_i} = \begin{cases} p_i' / a & \text{para el modo TE} \\ p_i / a & \text{para el modo TM} \end{cases} \quad (2.49c)$$

Finalmente la fórmula para determinar la magnitud del campo eléctrico total para un punto (r, θ, z) cualquiera en el interior del tejido, de acuerdo a la ref. (3) es la siguiente:

$$|EA| = (|EA_r|^2 + |EA_\theta|^2 + |EA_z|^2)^{1/2} \quad (2.50)$$

CAPITULO III

DISEÑO DEL PROGRAMA

El capítulo a desarrollar se centra en la estructura y la codificación del programa implementado, el mismo que ha de formar parte del grupo de 'software' clasificado como **Diseño Ayudado por Computadora**. Está escrito en lenguaje FORTRAN, con el cual el ingeniero se familiariza mejor, e instalado en el sistema IBM 4341 del Centro de Servicios Computacionales de la ESPOL.

3.1 Generalidades

La creación de un programa de computación que se encargue de ejecutar completamente los cálculos referentes al desarrollo matemático multimodal está plenamente justificado debido a que realizarlos a mano no únicamente sería ineficaz, y lento, sino que podría calificarse de obsoleto por los motivos siguientes:

- El análisis exige que las matrices sean de grandes dimensiones, con miras a lograr gran exactitud en la obtención de los resultados.

- Las variables y matrices casi en su totalidad son números complejos.
- La formulación matemática contiene integrales y otro tipo de expresiones, y requieren que sean evaluados mediante soluciones iterativas.

La estructura del programa, tanto en su extensión como en su constitución, ha tratado de ser en lo posible óptima y aplicando conceptos de programación modular, ha sido dividido en 11 partes a detallar posteriormente.

3.2 Especificaciones de Entrada/Salida

El conjunto de datos y variables que manipula el programa en realidad es voluminoso, como lo demuestra el paquete de ecuaciones desarrolladas en el capítulo anterior, por lo tanto no es posible detallar la aparición de todos ellos, sin embargo más adelante junto con los diagramas de flujo se mencionará algo sobre las variables de mayor importancia.

En esta parte se versa con detalle, sobre los datos de entrada y salida que maneja el programa en el estudio de una alternativa dada de aplicador.

- Datos de Entrada

Dos clases de datos solicita el programa:

- Tablas de datos que obedecen al ordenamiento ascendente de los valores de las raíces de la función de Bessel y de su primera derivada para los modos TM y TE respectivamente.
- el archivo RA DA contiene los valores de las raíces, en total 180.
- el archivo IN DA contiene tres columnas de datos:
 - la primera el valor de $n = 1, 2, \dots, 9$.
 - la segunda el valor de $m = 1, 2, \dots, 10$.
 - la tercera el tipo de modo, $TE=0$, $TM=1$.
- Los valores de las características del sistema aplicador-tejido siguientes:
 - frecuencia de operación, (real, en GHz.).
 - para el aplicador:
 - permitividad relativa del relleno dielectrico, (complejo, adimensional).
 - permeabilidad relativa, (complejo, adimen.).
 - diámetro de la guía. (real, en mm.).
 - para el tejido biológico:
 - permitividad relativa. (complejo).
 - permeabilidad relativa. (complejo).

- Datos de Salida

- El coeficiente de reflexión del modo fundamental TE₁₁, en el aplicador dado por el elemento S₂₂(1,1), (magnitud y fase, adimen.).
- El campo eléctrico total, en el interior del tejido biológico, (magnitud y fase, en V/m.).
 - para cada plano radial, (en mm.).
 - varios ángulos, (en grados.).
 - magnitud del campo vs. eje z, en mm.

Conjuntamente las características de entrada y los datos de salida pueden ser siempre registrados tanto por pantalla como en un archivo, conforme se necesite. (Diríjase al Manual del Usuario en el apéndice C).

3.3 Diagramas de Flujo

El programa consta de las 11 partes siguientes:

- **Programa Principal.**

Realiza el cálculo de la magnitud del campo eléctrico total en el tejido, las variables de mayor importancia están listadas a continuación:

- FRE frecuencia de operación.
- NMA número de modos en el tejido, (M).
- UA permeabilidad relativa del tejido.
- EA permitividad relativa del tejido.
- RA radio de la guía A, tejido.
- NMB número de modos en el aplicador, (N).
- UB permeabilidad relativa en el aplicador.
- EB permitividad relativa en el aplicador.
- RB radio de la guía B, aplicador.
- RFB, RDB tabla de raíces de la función de Bessel y su derivada, respectivamente.
- IN, IM tabla de subíndice modales n m.
- NBAN tabla ordenada del indicador de modo.
- ST22 submatriz de dispersión modal, (S22).
- ST12 submatriz de dispersión modal, (S12).
- BM matriz amplitudes reflejadas, B1.
- COP coeficiente de propagación del modo i.
- CETD magnitud del campo eléctrico total.

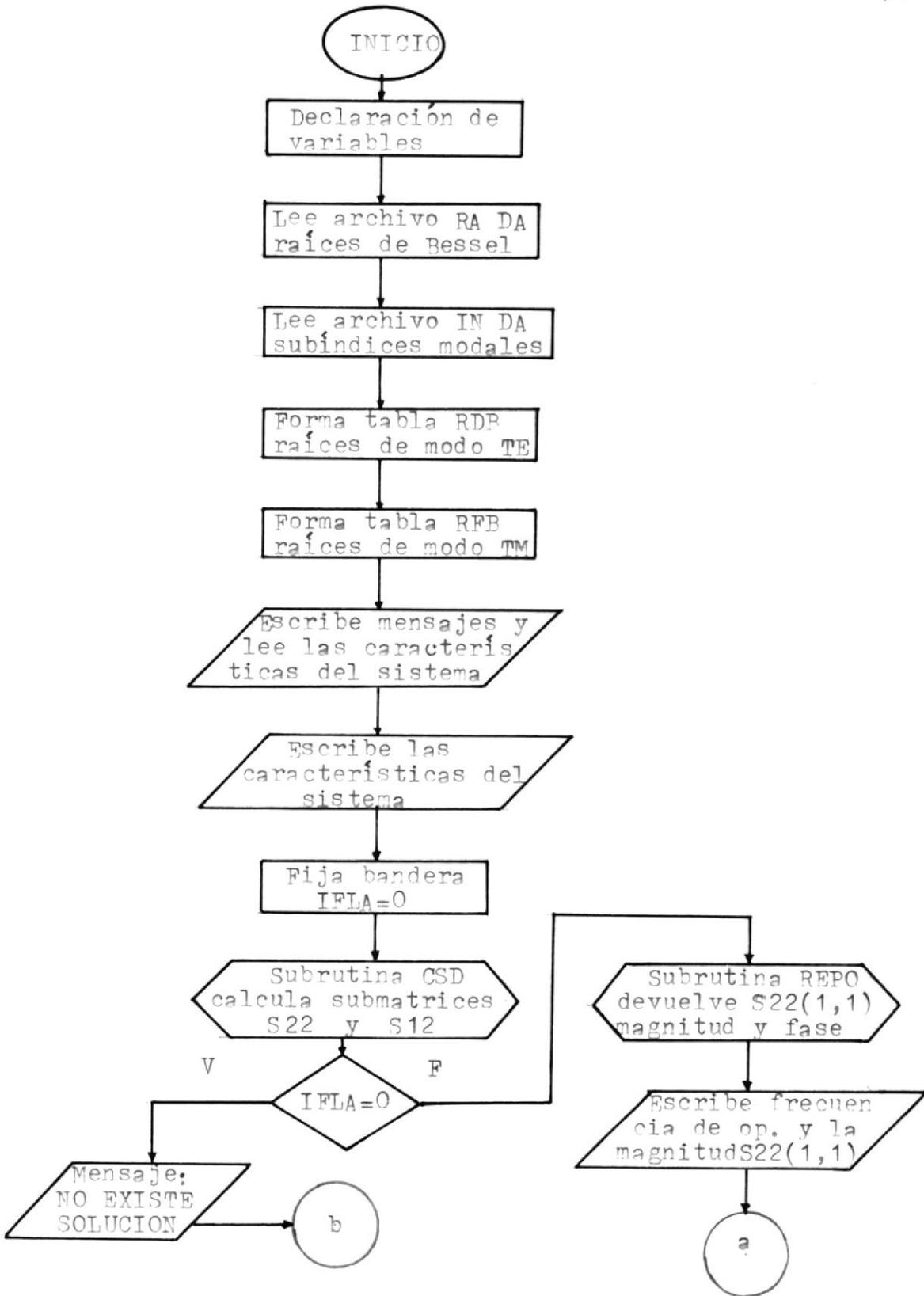
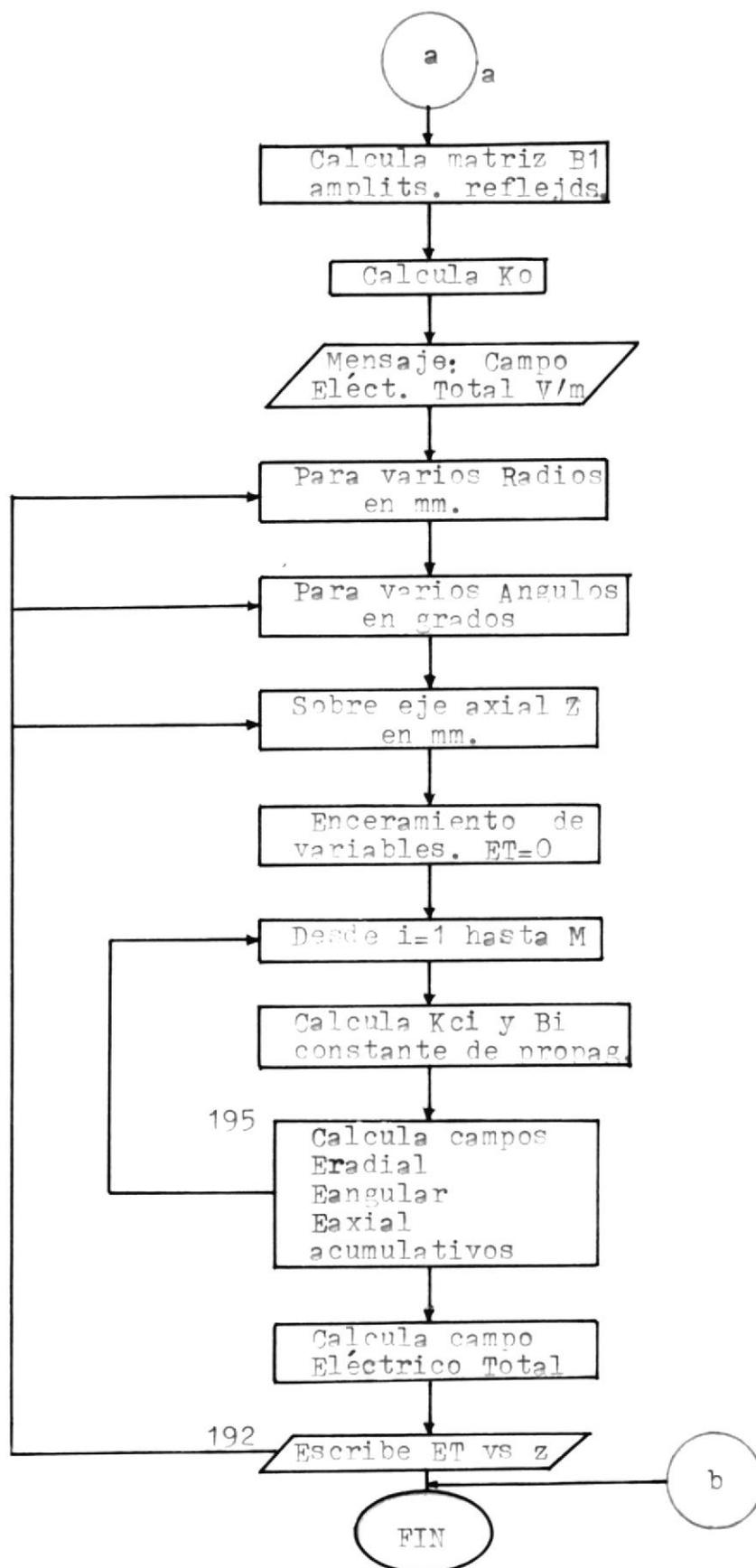


FIG. 3.1 Diagrama de Flujo del programa principal.



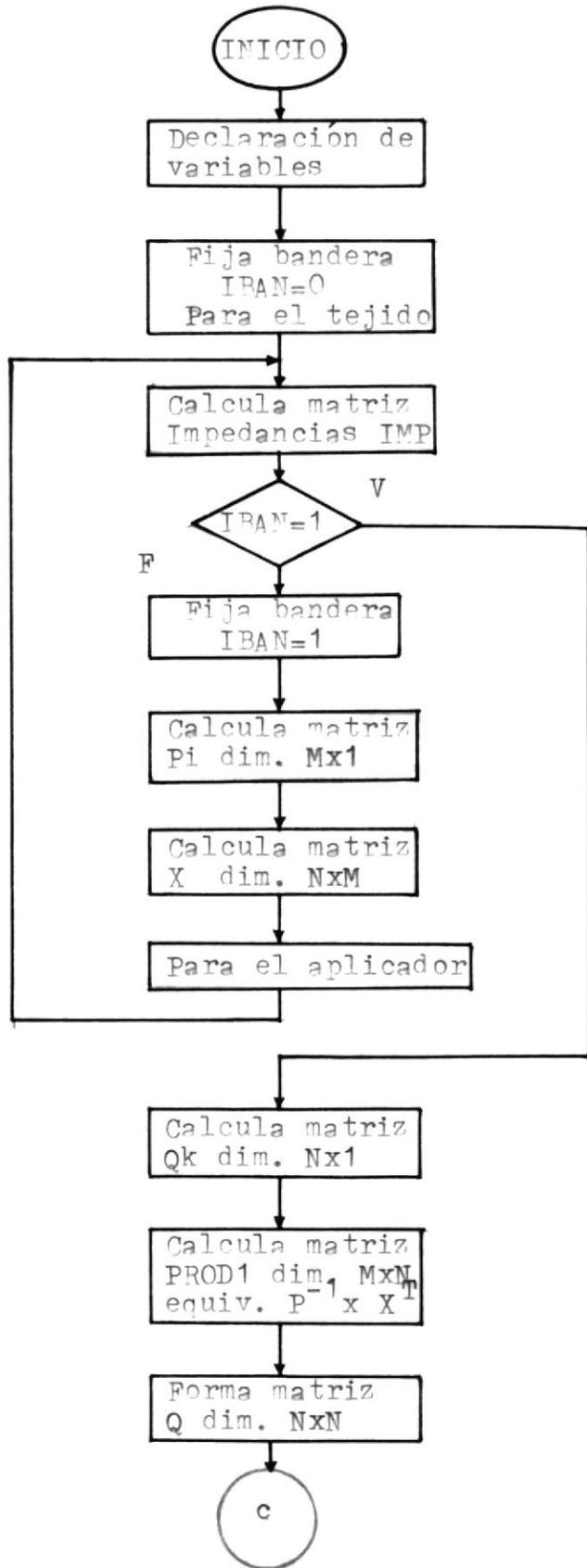
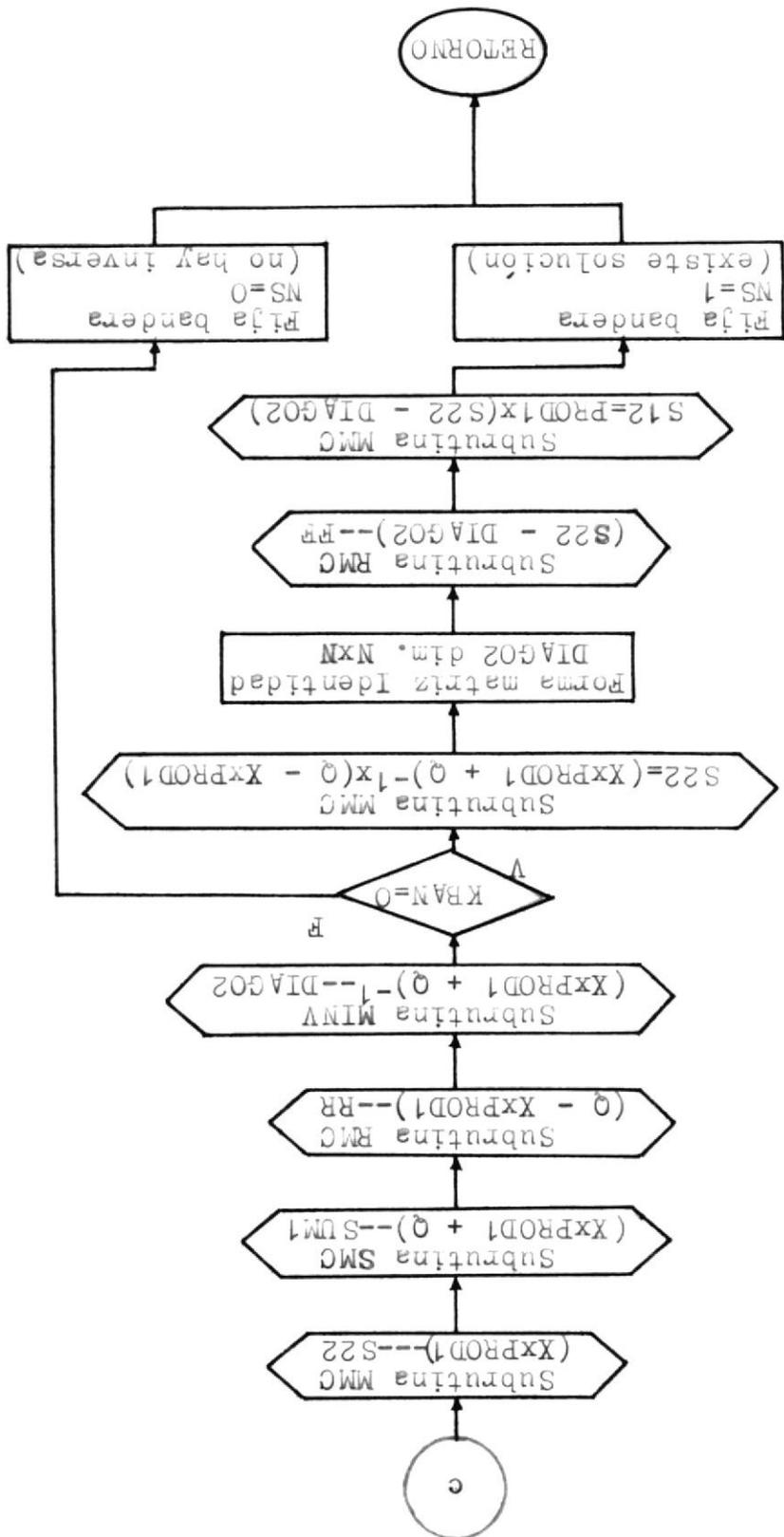


FIG. 3.1a Diagrama de Flujo. Subrutina CSD



- Subrutina CSD.

Calcula las submatrices de dispersión S22 y S12 y sus argumentos son los siguientes:

- UGA permeabilidad relativa del tejido.
- EGA permitividad relativa del tejido.
- RGA radio de la guía A, tejido.
- UGB permeabilidad relativa en el aplicador.
- EGB permitividad relativa en el aplicador.
- RGB radio de la guía B, aplicador.
- FOP frecuencia de operación del sistema.
- NS indica si existe o no solución.

A parte de las variables comunes al programa principal ya citadas se tienen:

- IPM matriz impedancias de onda.
- ELPI matriz P_i dimensión $M \times 1$.
- ELQJ matriz Q_k de dimensión $N \times 1$.
- ELXJI matriz X dimensión $N \times M$.
- PROD1 matriz que evita utilización de matrices de dimensiones $M \times M$, lográndose así ahorrar memoria. Equivale a la siguiente operación matricial: $P^{-1} * X^T$ de dimensiones $M \times N$.
- FF matriz Q dimensión $N \times N$.



- Subrutina MINV.

Realiza el cálculo de la Inversa de una Matriz Compleja, mediante el algoritmo de Gauss-Jordan modificado, los argumentos son:

- A matriz con la que se trabaja, dimensión NxN.
- C matriz inversa resultante, dimensión NxN.
- IDET indica la existencia de la matriz inversa \emptyset si no existe, 1 si no fue posible calcularla.

- Subrutina SMC.

Ejecuta la suma de matrices complejas, sus argumentos son:

- A matriz primer sumando, dimensión MxN.
- B matriz segundo sumando, dimensión MxN.
- C matriz resultante, dimensión MxN.

- Subrutina RMC.

Resta matrices complejas, sus argumentos son:

- X matriz minuendo, dimensión MxN.
- Y matriz substraendo, dimensión MxN.
- Z matriz diferencia, dimensión MxN.

- Subrutina MMC.

Realiza la multiplicación de matrices complejas, sus argumentos son:

- X matriz primer multiplicando, dimensión MxN.
- Y matriz segundo multiplicando, dimensión NxL.
- Z matriz producto, dimensión MxL.



- Subrutina REPO.

Transforma un número complejo representado en coordenadas rectangulares a su equivalente en polares, devolviendo la magnitud y la fase del mismo. Sus argumentos son:

- Z número complejo en forma rectangular.
- R magnitud de Z.
- TE fase de Z, (grados).

- Función FOINBE.

Calcula el valor de la Función de Bessel dada por la Forma Integral de Bessel:

$$J_n(x) = \frac{1}{\pi} * \int_0^{\pi} \cos(n*\phi - x*\text{sen}(\phi)) d\phi$$

La integral es evaluada mediante la regla de 1/3 de Simpson. Sus argumentos son:

- N1 valor entero n.
- X1 valor real x.

- **Función XJNDER.**

Ejecuta el cálculo del valor de la primera derivada de la función de Bessel mediante la siguiente relación de recurrencia:

$$J_n'(x) = (J_{n-1}(x) - J_{n+1}(x)) / 2$$

Por lo cual, a su vez se invoca a la función FOINBE y le traspasa argumentos del mismo tipo.

- **Función XINTE.**

Devuelve el valor de las integrales que aparecen en las expresiones para la Matriz P, misma que calcula las integrales para la Matriz Q. También se aplica la regla de 1/3 de Simpson para evaluar la integral; los argumentos que necesita son:

- R valor del radio la guía.
- NP valor del índice modal n.
- PNM valor de la raíz de la función de Bessel o de su derivada, según sea modo TE o TM.

- N1 identificador que indica cuál de las 2 integrales evaluar, la del primero o segundo sumando de la ecuación.

Hace uso de la función FOINBE y XJNDER para determinar el valor de las ecuaciones integrales correspondientes.

- Función XXJI.

Efectúa el cálculo del valor de las integrales que están en la ecuación para la Matriz X, utilizando la regla de 1/3 de Simpson. A su vez invoca a las funciones FOINBE y XJNDER. Sus argumentos son:

- RA radio de la guía A.
- RB radio de la guía B.
- NN valor del índice modal n para la guía A.
- NP valor del índice modal s para la guía B.
- PNM valor de la raíz de Bessel o su derivada para la guía A.
- PPQ valor de la raíz de Bessel o de su derivada para la guía B.
- N1 identificador que indica cuál de las 2 integrales evaluar, la del primero o segundo sumando de la ecuación.

```

*****
**** ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL ****
*****
**** FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA. ELECTRONICA ****
*****
**** TITULO DE LA TESIS ****
**** ' DESARROLLO DE UN APLICADOR DE MICROONDAS DE ****
**** APERTURA CIRCULAR PARA IRRADIACION BIOMEDICA ' ****
*****
**** AUTOR CARLOS SANCHEZ NARVAEZ ****
*****
**** DIRECTOR CARLOS BECERRA ESCUDERO ****
*****
**** LUGAR/FECHA GUAYAQUIL OCTUBRE 1 DE 1989 ****
*****
**** PROGRAMA PRINCIPAL ****
PARAMETER(NMA=180,NMB=5)
REAL*8 FOINBE,XJNDER
COMPLEX UR,UI,UA,EA,UB,EB,CEZ,COP,COE1,COE2,COE3
COMPLEX BM(NMA),ST12(NMA,NMB),ST22(NMB,NMB)
COMMON /ZONA/ ST12,ST22
COMMON /ZONB/ RDB,RFB,IN,IM,NBAN
DIMENSION RAIZ(180),IN(180),IM(180),NBAN(180)
DIMENSION RFB(10,9),RDB(10,9)
**** LECTURA DE LAS TABLAS DE RAICES DE BESSEL PARA ****
**** LLEVAR A CABO LA UNIFICACION DE LOS MODOS ****
READ(1,15)(RAIZ(I),I=1,180)
15 FORMAT(9F6.2)
DO 11 I=1,180
READ(2,*) IN(I),IM(I),NBAN(I)
11 CONTINUE
**** FORMACION DE LAS TABLAS DE RAICES DE BESSEL ****
INT=0
**** RAICES DERIVADA DE BESEL. MODOS TE ****
DO 6 I=1,10
DO 6 J=1,9
INT=INT+1
6 RDB(I,J)=RAIZ(INT)
**** RAICES FUNCION DE BESEL. MODOS TM ****
DO 7 I=1,10
DO 7 J=1,9
INT=INT+1
7 RFB(I,J)=RAIZ(INT)
**** DEFINICION DE VALORES CONSTANTES ****
UR=CMPLX(1.,0.)
UI=CMPLX(0.,1.)
PI=4.*ATAN(1.0)
**** VALORES QUE EL USUARIO PUEDE CAMBIAR * INICIO BLOQUE *
**** ASEGURAR QUE SEAN MAYORES QUE CERO ****
WRITE(6,1)
1 FORMAT(1X,'DIGITE FREC.DE OPERACION (GHZ.): XX.XX ')
READ(6,*) FRE
**** CARACTERISTICAS DE LA GUIA B (APLICADOR) ****
WRITE(6,5)
5 FORMAT(1X,'CARACTERISTICAS DEL APLICADOR')
WRITE(6,3)
3 FORMAT(1X,'DIGITE DIAMETRO GUIA (MM.): XX.XX ')

```

```

      READ(6,*) DB
      RB=DB/2.
      UB=UR
      WRITE(6,4)
      READ(6,*) EB
C**** CARACTERISTICAS DE LA GUIA A (TEJIDO IRRADIADO) *****
      WRITE(6,2)
      2  FORMAT(1X,'CARACTERISTICAS DEL TEJIDO ')
      RA=6.*RB
      UA=UR
      WRITE(6,4)
      4  FORMAT(1X,'DIGITE PERMITIVIDAD DIE. RELATI.: (XX.XX)')
      READ(6,*) EA
C**** VALORES QUE EL USUARIO PUEDE CAMBIAR ** FIN BLOQUE **
C**** SALIDA DE DATOS DE PARTIDA *****
      IF(RA) 222,222,39
      39  IF(RB) 222,222,38
      38  WRITE(6,41)
      WRITE(7,41)
      41  FORMAT(5X,'DISEÑO APLICADOR DE MICROONDAS CILINDRICO')
      WRITE(6,42)
      WRITE(7,42)
      42  FORMAT(31X,' APLICADOR      TEJIDO ')
      WRITE(6,43) REAL(EB),AIMAG(EB),REAL(EA),AIMAG(EA)
      WRITE(7,43) REAL(EB),AIMAG(EB),REAL(EA),AIMAG(EA)
      43  FORMAT(5X,'PERMITIVIDAD DIELECTRICA ',1X,2F6.1,3X,2F6.1)
      WRITE(6,44) REAL(UB),AIMAG(UB),REAL(UA),AIMAG(UA)
      WRITE(7,44) REAL(UB),AIMAG(UB),REAL(UA),AIMAG(UA)
      44  FORMAT(5X,'PERMEABILIDAD MAGNETICA ',1X,2F6.1,3X,2F6.1)
      WRITE(6,45) RB*2.,RA*2.
      WRITE(7,45) RB*2.,RA*2.
      45  FORMAT(5X,'DIAMETRO GUIA (MM.)',8X,F5.1,10X,F5.1)
      WRITE(6,46) NMB,NMA
      WRITE(7,46) NMB,NMA
      46  FORMAT(5X,'NUMERO DE MODOS      ',8X,I3,12X,I3)
      WRITE(6,8) FRE
      WRITE(7,8) FRE
      8  FORMAT(5X,'FREC. DE OPERACION (GHZ.) ',F5.2/)
C**** CALCULAR LAS SUBMATRICES DISPERSION ST12 Y ST22 *****
      412  IFLA=0
      CALL CSD(UA,EA,RA,UB,EB,RB,FRE,IFLA)
      IF(IFLA.EQ.0) GO TO 222
C**** DATOS SALIDA: COEF. REFLEXION Y TRANSMISION *****
      COE1=ST22(1,1)
      COE2=ST12(1,1)
      CALL REPO(COE1,COREM,COREA)
      CALL REPO(COE2,COTRM,COTRA)
      WRITE(6,49)
      WRITE(7,49)
      49  FORMAT(5X,' MA.CO.REF FA.CO.REF MA.CO.TRA FA.CO.TRA')
      WRITE(6,239) COREM,COREA,COTRM,COTRA
      WRITE(7,239) COREM,COREA,COTRM,COTRA
      239  FORMAT(5X,4E10.2)
C**** CALCULO DE LA MATRIZ AMPLITUDES REFLEJADAS EN GUIA A *
      100  XK1=1.0
      DO 101 I=1,NMA
      101  BM(I)=ST12(I,1)*XK1
      199  COKO=PI*FRE/150.

```

```

C**** CALCULO DEL CAMPO ELECTRICO TOTAL *****
106 WRITE(6,388)
WRITE(7,388)
388 FORMAT(/5X,'CAMPO ELECTRICO TOTAL VS EJE Z ')
C**** CALCULO PARA R=0.0 NO DEBE HACERSE *****
DO 192 R1=0.1,24.2,6.0
WRITE(6,335) R1
WRITE(7,335) R1
335 FORMAT(/5X,'PLANO RADIAL (MM) ',F5.1)
DO 192 FA1=0.0,0.8*PI,PI/4.
WRITE(6,336) FA1*180./PI
WRITE(7,336) FA1*180./PI
336 FORMAT(/10X,'CURVA ANGULAR (GRADOS) ',F5.1)
WRITE(6,334)
WRITE(7,334)
334 FORMAT(20X,'MAG. ET (V/M) ',5X,'EJE Z (MM)'/)
DO 192 Z1=2.5,33.1,5.0
CETO=0.0
COE1=CMPLX(0.0,0.0)
COE2=CMPLX(0.0,0.0)
COE3=CMPLX(0.0,0.0)
DO 195 I=1,NMA
INT=IN(I)
IMT=IM(I)
IF(NBAN(I).EQ.0) THEN
RTEMP=RDB(IMT,INT)*R1/RA
COP=UI*CSQRT(UR*(COKO**2-(RTEMP/R1)**2))
COE2=COE2-INT*FOINBE(INT,RTEMP)*COS(INT*FA1)*BM(I)
2*CEXP(COP*Z1)/RTEMP
COE3=COE3+XJNDER(INT,RTEMP)*SIN(INT*FA1)*BM(I)
3*CEXP(COP*Z1)
ELSE
RTEMP=RFB(IMT,INT)*R1/RA
COE1=COE1-RTEMP*FOINBE(INT,RTEMP)*SIN(INT*FA1)*BM(I)
1*CEXP(COP*Z1)/(R1*COP)
COE2=COE2+XJNDER(INT,RTEMP)*SIN(INT*FA1)*BM(I)
2*CEXP(COP*Z1)
COE3=COE3+INT*FOINBE(INT,RTEMP)*COS(INT*FA1)*BM(I)
3*CEXP(COP*Z1)/RTEMP
ENDIF
195 CONTINUE
CETO=SQRT(CABS(COE1)**2+CABS(COE2)**2+CABS(COE3)**2)
WRITE(6,331) CETO,Z1
WRITE(7,331) CETO,Z1
331 FORMAT(20X,E10.2,10X,F5.1)
192 CONTINUE
STOP
222 WRITE(6,112)
WRITE(7,112)
112 FORMAT(/5X,'NO EXISTE SOLUCION')
STOP
END
C*****
C**** SUBROUTINA PARA REALIZAR EL CALCULO LAS *****
C**** SUBMATICES DE DISPERSION ST22 Y ST12 *****
SUBROUTINE CSD(UGA,EGA,RGA,UGB,EGB,RGB,FOP,NS)
PARAMETER(NMA=180,NMB=5)
REAL*8 XINTE,XXJI

```

```

COMPLEX  UR,UI,UGA,EGA,UGB,EGB,VAC1,VAC2,CZM,CFM
COMPLEX  ST12(NMA,NMB),ST22(NMB,NMB)
COMPLEX  IMP(NMA),ELPI(NMA),ELQJ(NMB),ELXJI(NMB,NMA)
COMPLEX  FF(NMB,NMB),RR(NMB,NMB),DIAGO2(NMB,NMB)
COMPLEX  SUM1(NMB,NMB),PROD1(NMA,NMB)
COMMON /ZONA/ ST12,ST22
COMMON /ZONB/ RDB,RFB,IN,IM,NBAN
DIMENSION RA(180),IN(180),IM(180),NBAN(180)
DIMENSION RFB(10,9),RDB(10,9)
C**** DEFINICION DE VALORES CONSTANTES *****
UR=CMPLX(1.,0.)
UI=CMPLX(0.,1.)
PI=4.*ATAN(1.0)
C**** DEFINICION DE BANDERAS *****
KBAN=0
NS=0
IBAN=0
C**** CALCULO DE LAS IMPEDANCIAS IMP(NMA) *****
CZM=120.*PI*CSQRT(UGA/EGA)
CFM=PI*RGAFOP*CSQRT(UGA*EGA)/150.
NURE=NMA
400 DO 100 K=1,NURE
INT=IN(K)
IMT=IM(K)
IF(NBAN(K).EQ.1) GO TO 110
IMP(K)=CZM/CSQRT(1-(RDB(IMT,INT)/CFM)**2)
GO TO 100
110 IMP(K)=CZM*CSQRT(1-(RFB(IMT,INT)/CFM)**2)
100 CONTINUE
IF(IBAN.EQ.1) GO TO 410
IBAN=1
C**** CALCULO DE LOS ELEMENTOS PI *****
DO 200 I=1,NMA
INT=IN(I)
IMT=IM(I)
ELPI(I)=CMPLX(.0,.0)
VAC1=PI*(RGA*INT)**2/IMP(I)
VAC2=PI/IMP(I)
IF(NBAN(I).EQ.0) THEN
RTEMP=RDB(IMT,INT)
ELSE
RTEMP=RFB(IMT,INT)
ENDIF
ELPI(I)=VAC1*XINTE(RGA,INT,RTEMP,0)/RTEMP**2-
1VAC2*XINTE(RGA,INT,RTEMP,1)
IF(NBAN(I).EQ.1) ELPI(I)=-ELPI(I)
200 CONTINUE
C**** CALCULO DE LOS ELEMENTOS XJI *****
DO 300 JF=1,NMB
DO 300 IC=1,NMA
INT=IN(IC)
IMT=IM(IC)
INTB=IN(JF)
IMTB=IM(JF)
ELXJI(JF,IC)=CMPLX(.0,.0)
IF(JF.NE.IC) GO TO 310
330 VAC1=PI*RGARGB*INT**2/IMP(IC)
VAC2=PI/IMP(IC)

```

```

IF(NBAN(JF).EQ.0) THEN
RTEMP=RDB(IMT,INT)
RTEMP1=RDB(IMTB,INT)
ELSE
RTEMP=RFB(IMT,INT)
RTEMP1=RFB(IMTB,INT)
ENDIF
ELXJI(JF,IC)=VAC1*XXJI(RGA,RGB,INT,INT,RTEMP,RTEMP,0)/
1(RTEMP*RTEMP1)-VAC2*XXJI(RGA,RGB,INT,INT,RTEMP,RTEMP,-2)
IF(NBAN(JF).EQ.1) ELXJI(JF,IC)=-ELXJI(JF,IC)
GO TO 300
310 IF(INT.NE.INTB) GO TO 300
320 VAC1=-0.25*RGB/IMP(IC)
VAC2=-0.25*RGA/IMP(IC)
IF(NBAN(JF).EQ.0) THEN
RTEMP=RDB(IMTB,INTB)
RTEMP1=RFB(IMT,INT)
ELSE
RTEMP=RFB(IMTB,INTB)
RTEMP1=RDB(IMT,INT)
ENDIF
ELXJI(JF,IC)=VAC1*XXJI(RGA,RGB,INT,INTB,RTEMP1,RTEMP,2)/
1RTEMP+VAC2*XXJI(RGA,RGB,INT,INTB,RTEMP1,RTEMP,12)/RTEMP1
300 CONTINUE
C**** FIN DEL CALCULO DE ELEMENTOS XJI *****
C**** CALCULO DE LAS IMPEDANCIAS IMP(NMB) *****
CZM=120.*PI*CSQRT(UGB/EGB)
CFM=PI*RGB*FOP*CSQRT(UGB*EGB)/150.
NURE=NMB
GO TO 400
410 CONTINUE
C**** CALCULO DE LOS ELEMENTOS QJ *****
DO 500 J=1,NMB
INT=IN(J)
IMT=IM(J)
ELQJ(J)=CMPLX(.0,.0)
VAC1=PI*(RGB*INT)**2/IMP(J)
VAC2=PI/IMP(J)
IF(NBAN(J).EQ.0) THEN
RTEMP=RDB(IMT,INT)
ELSE
RTEMP=RFB(IMT,INT)
ENDIF
ELQJ(J)=VAC1*XINTE(RGB,INT,RTEMP,0)/RTEMP**2-
1VAC2*XINTE(RGB,INT,RTEMP,3)
IF(NBAN(J).EQ.1) ELQJ(J)=-ELQJ(J)
500 CONTINUE
C**** CALCULO DE LA MATRIZ PROD1 *****
DO 600 I=1,NMA
DO 600 J=1,NMB
PROD1(I,J)=CMPLX(.0,.0)
IF(ELPI(I).EQ.0) GO TO 610
605 PROD1(I,J)=ELXJI(J,I)/ELPI(I)
GO TO 600
610 IF(ELXJI(J,I).EQ.0) GO TO 620
615 WRITE(6,611)
611 FORMAT(5X,'DIVISION POR CERO EN PROD1')
KBAN=1

```

```

GO TO 600
620 WRITE(6,612)
612 FORMAT(5X,'INDETERMINACION NULA EN PROD1')
KBAN=1
600 CONTINUE
IF(KBAN.EQ.1) GO TO 991
C**** FORMACION DE LA MATRIZ Q *****
579 DO 580 I=1,NMB
DO 580 J=1,NMB
FF(I,J)=CMPLX(0.,0.)
IF(I.EQ.J) FF(I,J)=ELQJ(I)
580 CONTINUE
C**** CALCULO DE LAS SUBMATRICES S22 Y S12 *****
CALL MMC(ELXJI,PROD1,NMB,NMA,NMB,ST22)
CALL SMC(ST22,FF,NMB,NMB,SUM1)
CALL RMC(FF,ST22,NMB,NMB,RR)
CALL MINV(SUM1,NMB,DIAGO2,KBAN)
IF(KBAN.EQ.0) GOTO 990
CALL MMC(DIAGO2,RR,NMB,NMB,NMB,ST22)
C**** FORMACION DE LA MATRIZ IDENTIDAD *****
DO 102 I=1,NMB
DO 102 J=1,NMB
DIAGO2(I,J)=CMPLX(0.,0.)
IF(I.EQ.J) DIAGO2(I,J)=CMPLX(1.,0.)
102 CONTINUE
CALL SMC(ST22,DIAGO2,NMB,NMB,FF)
CALL MMC(PROD1,FF,NMA,NMB,NMB,ST12)
NS=1
RETURN
990 WRITE(6,229)
WRITE(7,229)
229 FORMAT(5X,'EXISTE ERROR EN LA INVERSION')
991 NS=0
RETURN
END
C*****
C**** SUBROUTINA PARA CALCULAR LA INVERSA DE UNA MATRIZ *****
C**** COMPLEJA POR EL METODO DE GAUSS-JORDAN MODIFICADO ****
C**** A=MATRIZ CUYA INVERSA SE DESEA OBTENER *****
C**** N=ORDEN DE LA MATRIZ A *****
C**** IDET=VALOR DEL DETERMINANTE DE MATRIZ A *****
C**** C=MATRIZ INVERSA RESULTANTE *****
C**** ERRO=ERROR QUE SE DESEA OBTENER *****
SUBROUTINE MINV(A,N,C,IDET)
COMPLEX A(N,N),C(N,N),RAMAX,TEMP,ATEMP
INTEGER MVR(180),MVC(180)
ERRO=0.00001
C**** FORMACION DE LA MATRIZ IDENTIDAD *****
DO 2 I=1,N
DO 2 J=1,N
C(I,J)=CMPLX(.0,.0)
IF(I.EQ.J) C(I,J)=CMPLX(1.,0.)
2 CONTINUE
C**** INICIALIZAR COLUMNA Y FILA PIVOTE *****
DO 3 I=1,N
MVR(I)=0
3 MVC(I)=0
C**** BUSCAR EL ELEMENTO MAYOR PARA SER USARLO DE PIVOTE ***

```



BIBLIOTECA

```

DO 15 K=1,N
RAMAX=CMPLX(.0,.0)
LC=0
LR=0
DO 5 I=1,N
IF(MVR(I).EQ.I) GO TO 5
DO 4 J=1,N
IF(MVC(J).EQ.J) GO TO 4
IF(CABS(RAMAX).GE.CABS(A(I,J))) GO TO 4
RAMAX=A(I,J)
LR=I
LC=J
4 CONTINUE
5 CONTINUE
IF(CABS(RAMAX).LT.ERRO) GO TO 17
C**** PROCESO DE ELIMINACION *****
IF(LR.EQ.LC) GO TO 10
DO 9 I=1,N
TEMP=A(LR,I)
A(LR,I)=A(LC,I)
A(LC,I)=TEMP
TEMP=C(LR,I)
C(LR,I)=C(LC,I)
9 C(LC,I)=TEMP
10 DO 11 I=1,N
A(LC,I)=A(LC,I)/RAMAX
11 C(LC,I)=C(LC,I)/RAMAX
DO 13 I=1,N
IF(I.EQ.LC) GO TO 13
ATEMP=A(I,LC)
DO 12 J=1,N
A(I,J)=A(I,J)-ATEMP*A(LC,J)
12 C(I,J)=C(I,J)-ATEMP*C(LC,J)
13 CONTINUE
MVR(LC)=LC
MVC(LC)=LC
15 CONTINUE
IDET=1
RETURN
17 IDET=0
RETURN
END
C*****
C**** SUBROUTINA PARA MULTIPLICAR 2 MATRICES COMPLEJAS *****
C**** X=MATRIZ DE ORDEN MXN *****
C**** Y=MATRIZ DE ORDEN NXL *****
C**** Z=MATRIZ DE ORDEN MXL *****
SUBROUTINE MMC(X,Y,M,N,L,Z)
COMPLEX X(M,N),Y(N,N),Z(M,L)
DO 30 I=1,L
DO 30 J=1,M
Z(J,I)=CMPLX(0.0,0.0)
DO 30 K=1,N
Z(J,I)=Z(J,I)+X(J,K)*Y(K,I)
30 CONTINUE
RETURN
END

```

```

C*****
C**** SUBROUTINA PARA SUMAR 2 MATRICES COMPLEJAS *****
C**** A=MATRIZ DE ORDEN MXN *****
C**** B=MATRIZ DE ORDEN MXN *****
C**** C=MATRIZ RESULTANTE DE ORDEN MXN *****
      SUBROUTINE SMC(A,B,M,N,C)
      COMPLEX A(M,N),B(M,N),C(M,N)
      DO 10 I=1,M
      DO 10 J=1,N
      C(I,J)=A(I,J)+B(I,J)
10    CONTINUE
      RETURN
      END

C*****
C**** SUBROUTINA PARA RESTAR 2 MATRICES COMPLEJAS *****
C**** X=MATRIZ DE ORDEN MXN *****
C**** Y=MATRIZ DE ORDEN MXN *****
C**** Z=MATRIZ RESULTANTE DE ORDEN MXN *****
      SUBROUTINE RMC(X,Y,M,N,Z)
      COMPLEX X(M,N),Y(M,N),Z(M,N)
      DO 20 I=1,M
      DO 20 J=1,N
      Z(I,J)=X(I,J)-Y(I,J)
20    CONTINUE
      RETURN
      END

C*****
C**** SUBROUTINA QUE TRANSFORMA UN VALOR COMPLEJO *****
C**** A FORMA POLAR *****
      SUBROUTINE REPO(Z,R,TE)
      COMPLEX Z
      PI=4.*ATAN(1.)
      A=REAL(Z)
      B=AIMAG(Z)
      IF(A) 10,15,10
15    IF(B) 10,20,10
20    R=0.0
      TE=0.0
      RETURN
10    R=CABS(Z)
      TE=ATAN2(B,A)
      TE=TE*180./PI
      RETURN
      END

C*****
C**** FUNCION PARA CALCULAR LA FORMA INTEGRAL DE BESSEL ****
C**** MEDIANTE LA REGLA DE 1/3 DE SIMPSON *****
      REAL FUNCTION FOINBE(N1,X1)
      REAL*8 DELTA
      PI=4.*ATAN(1.0)
      FOINBE=0.0
      IF(N1) 10,20,20
10    WRITE(6,15)
15    FORMAT(5X,'ERROR EN LA FUNCION DE BESSEL')
      RETURN
20    IF(X1) 10,30,30
C**** M ES EL NUMERO DE DIVISIONES (AREAS) *****
30    M=20
      DELTA=PI/M

```

```

FOINBE=1.+4.*DCOS(N1*DELTA-X1*DSIN(DELTA))+COS(N1*PI)
DO 60 II=2,M-2,2
  I=II
60  FOINBE=FOINBE+2.*DCOS(N1*DELTA*I-X1*DSIN(DELTA*I))
  1  +4.*DCOS(N1*DELTA*(I+1)-X1*DSIN(DELTA*(I+1)))
  FOINBE=FOINBE*DELTA/(3.*PI)
  RETURN
END
C*****
C**** FUNCION PARA CALCULAR LA PRIMERA DERIVADA DE BESSEL **
C**** MEDIANTE LA RELACION DE RECURRENCIA *****
REAL FUNCTION XJNDER(N3,X3)
REAL*8 FOINBE
XJNDER=0.0
IF(N3) 10,30,40
10  WRITE(6,15)
15  FORMAT(5X,'ERROR EN LA DERIVADA BESSEL')
RETURN
30  XJNDER=-FOINBE(1,X3)
RETURN
40  XJNDER=(FOINBE(N3-1,X3)-FOINBE(N3+1,X3))/2.
RETURN
END
C*****
C**** FUNCION PARA CALCULAR LAS INTEGRALES DE PI O QJ *****
REAL FUNCTION XINTE(R,NP,PNM,N1)
REAL*8 FOINBE,XJNDER
XINTE=0.0
IF(R) 10,10,20
10  WRITE(6,15)
15  FORMAT(5X,'ERROR EN LA FUNCION XINTE')
RETURN
C**** M ES EL NUMERO DE DIVISIONES (AREAS) *****
20  M=20
  DELTA=R/M
  XA=PNM*DELTA/R
  IF(N1) 70,80,70
80  XINTE=(FOINBE(NP,0.))**2+4.*(FOINBE(NP,XA))**2
  1  +(FOINBE(NP,PNM))**2/M
  DO 60 II=2,M-2,2
    I=II
60  XINTE=XINTE+2.*(FOINBE(NP,XA*I))**2/I
  1  +4.*(FOINBE(NP,XA*(I+1)))**2/(I+1)
  XINTE=XINTE/3.
  RETURN
70  XINTE=(XJNDER(NP,0.))**2+4.*(XJNDER(NP,XA))**2
  1  +M*(XJNDER(NP,PNM))**2
  DO 90 JJ=2,M-2,2
    J=JJ
90  XINTE=XINTE+2.*J*(XJNDER(NP,XA*J))**2
  1  +4.*(J+1)*(XJNDER(NP,XA*(J+1)))**2
  XINTE=XINTE*DELTA**2/3.
  RETURN
END
C*****
C**** FUNCION PARA CALCULAR LAS INTEGRALES DE XJI *****
REAL FUNCTION XXJI(RA,RB,NN,NP,PNM,PPQ,N1)
REAL*8 FOINBE,XJNDER

```

```

        XXJI=0.0
        IF(RA) 10,10,15
15      IF(RB) 10,10,20
10      WRITE(6,5)
5       FORMAT(5X,'ERROR EN LA FUNCION XXJI')
        RETURN
C**** M ES EL NUMERO DE DIVISIONES (AREAS) ****
20      M=20
        DELTA=RB/M
        XA=PNM*DELTA/RA
        XB=PPQ*DELTA/RB
        IF(N1) 70,80,100
80      XXJI=FOINBE(NN,0.)*FOINBE(NP,0.)+4.*FOINBE(NN,XA)*
1       FOINBE(NP,XB)+FOINBE(NN,PNM)*FOINBE(NP,PPQ)/M
        DO 85 III=2,M-2,2
        I=III
85      XXJI=XXJI+2.*FOINBE(NN,XA*I)*FOINBE(NP,XB*I)/I+4.*
1       FOINBE(NN,XA*(I+1))*FOINBE(NP,XB*(I+1))/(I+1)
        XXJI=XXJI/3.
        RETURN
70      XXJI=XJNDER(NN,0.)*XJNDER(NP,0.)+4.*XJNDER(NN,XA)*
1       XJNDER(NP,XB)+XJNDER(NN,PNM)*XJNDER(NP,PPQ)*M
        DO 75 JJJ=2,M-2,2
        J=JJJ
75      XXJI=XXJI+2.*XJNDER(NN,XA*J)*XJNDER(NP,XB*J)*J+4.*
1       XJNDER(NN,XA*(J+1))*XJNDER(NP,XB*(J+1))*(J+1)
        XXJI=XXJI*DELTA**2/3.
        RETURN
100     IF(N1.GE.10) THEN
        XXJI=FOINBE(NN,0.)*XJNDER(NP,0.)+4.*FOINBE(NN,XA)*
1       XJNDER(NP,XB)+FOINBE(NN,PNM)*XJNDER(NP,PPQ)
        DO 105 KK=2,M-2,2
        K=KK
105     XXJI=XXJI+2.*FOINBE(NN,XA*K)*XJNDER(NP,XB*K)+4.*
1       FOINBE(NN,XA*(K+1))*XJNDER(NP,XB*(K+1))
        ELSE
        XXJI=FOINBE(NP,0.)*XJNDER(NN,0.)+4.*FOINBE(NP,XB)*
1       XJNDER(NN,XA)+FOINBE(NP,PPQ)*XJNDER(NN,PNM)
        DO 110 LL=2,M-2,2
        L=LL
110     XXJI=XXJI+2.*FOINBE(NP,XB*L)*XJNDER(NN,XA*L)+4.*
1       FOINBE(NP,XB*(L+1))*XJNDER(NN,XA*(L+1))
        ENDIF
        XXJI=XXJI*DELTA/3.
        RETURN
        END

```

CAPITULO IV

EJECUCION DEL PROGRAMA

Los resultados de la corrida del programa deben ser considerados como correctos siempre y cuando el usuario tenga consciencia de varios requisitos, nombrados en el capítulo segundo y que necesariamente deben contemplarse en el contexto del programa, para su codificación y ejecución, como se explica a continuación:

- La aplicación del criterio de **convergencia** del análisis multimodal, en el caso de aplicadores de apertura circular está definido por la ecu. 2.7, en donde, debe tenerse presente que entre mayor sea el número de modos a utilizar en el cálculo, se logrará que se imprima mayor grado de exactitud a los resultados. En el programa el número máximo de modos es 180, y la relación de radios empleada es de 6:1 para las guías A:B respectivamente.
- Si se parte del hecho de que en el aplicador existe un sólo modo propagante, el TE_{11} la frecuencia de corte está dada por la ecu. 2.47 con la cual el usuario está en facultad de jugar con los valores del radio y del relleno dielectrico del aplicador para una frecuencia

de operación escogida, pudiendo así **estudiar** varias alternativas de aplicadores de microondas tipo guíaonda circular.

- El algoritmo empleado para realizar la unificación de los modos, es tal que nos suministra una lista de los índices modales nm colocados en orden ascendente de acuerdo al valor de las raíces de la función de Bessel y de su primera derivada en un sólo archivo, que incluye un identificador que indica la clase de modo de propagación a la que pertenece, TE ó TM. Es de suma importancia anotar que en dicha lista están **excluidos** los valores de las raíces para los modos TE $_{0m}$ y los TM $_{0m}$, por los motivos siguientes:
 - Primero porque ellos deben ser eliminados del cálculo para que el Análisis Modal, en cuyas ecuaciones matriciales aparecen operaciones que necesitan determinar la Matriz Inversa, provea una solución para nuestro caso de guías circulares; La explicación es sencilla, si se observan las expresiones para las matrices P, Q y X, el lector notará que cuando los índices modales se anulan, $n=0$ para la guía A y $s=0$ para la B, dichas expresiones se anulan causando filas y columnas de ceros en dichas matrices, esto a fin de cuentas es determinante y no permite obtener la inversa de una matriz.

- Segundo porque la consideración de los Modos Degenerados en el cálculo requiere un desarrollo matemático extra que complicaría más la tarea.

La compensación de dicha omisión de modos exige que el método sea aplicado para un número de modos, de el mayor valor posible.

Las tablas de datos que obedecen al ordenamiento ascendente de los valores de las raíces de la función de Bessel y de su primera derivada, para los modos TM y TE respectivamente, están en registrados así:

- el archivo RA DA contiene los valores de las raíces, en total 180.
- el archivo IN DA contiene tres columnas de datos:
 - la primera el valor de $n= 1, 2, \dots, 9$.
 - la segunda el valor de $m= 1, 2, \dots, 10$.
 - la tercera el tipo de modo, TE=0, TM=1.

Ambos archivos son siempre necesarios para la ejecución del programa, y su contenido es totalmente independiente de la alternativa de aplicador cilíndrico que se halle bajo estudio, por lo cual dichas tablas de datos serán puestas en esta sección y no en las siguientes.

ARCHIVO RA DA

1.84	3.05	4.20	5.31	6.41	7.50	8.57	9.64	10.71
5.33	6.70	8.01	9.28	10.52	11.73	12.93	14.10	15.28
8.53	9.96	11.34	12.68	13.98	15.26	16.52	17.77	19.00
11.70	13.17	14.58	15.96	17.31	18.63	19.94	21.22	22.50
14.86	16.34	17.78	19.19	20.57	21.93	23.26	24.58	25.89
18.01	19.51	20.97	22.40	23.80	25.18	26.54	27.88	29.21
21.16	22.67	24.14	25.59	27.01	28.40	29.79	31.15	32.50
24.31	25.82	27.31	28.76	30.20	31.61	33.01	34.39	35.76
27.45	28.97	30.47	31.96	33.38	34.81	36.22	37.62	39.00
30.60	32.12	33.62	35.10	36.56	37.99	39.42	40.83	42.22
3.83	5.13	6.38	7.58	8.76	9.93	11.07	12.22	13.34
7.01	8.41	9.76	11.06	12.35	13.59	14.83	16.04	17.25
10.17	11.62	13.01	14.37	15.68	17.00	18.27	19.55	20.79
13.32	14.79	16.22	17.61	19.00	20.32	21.65	22.94	24.25
16.45	17.95	19.39	20.82	22.20	23.58	24.91	26.26	27.56
19.63	21.12	22.59	24.02	25.44	26.82	28.20	29.54	30.90
22.74	24.26	25.73	27.19	28.60	30.02	31.40	32.79	34.13
25.92	27.42	28.92	30.37	31.83	33.23	34.65	36.02	37.42
29.02	30.56	32.04	33.53	34.96	36.41	37.81	39.23	40.60
32.20	33.72	35.23	36.70	38.18	39.60	41.05	42.45	43.86

ARCHIVO IN DA

1,	1,	0
2,	1,	0
1,	1,	1
3,	1,	0
2,	1,	1
4,	1,	0
1,	2,	0
3,	1,	1
5,	1,	0
2,	2,	0
1,	2,	1
6,	1,	0
4,	1,	1
3,	2,	0
2,	2,	1
1,	3,	0
7,	1,	0
5,	1,	1
4,	2,	0
8,	1,	0
3,	2,	1
6,	1,	1
2,	3,	0
1,	3,	1
5,	2,	0
9,	1,	0
4,	2,	1
7,	1,	1
3,	3,	0
2,	3,	1
1,	4,	0
6,	2,	0
8,	1,	1
5,	2,	1
4,	3,	0
7,	2,	0
3,	3,	1
2,	4,	0
1,	4,	1
9,	1,	1
6,	2,	1
5,	3,	0
8,	2,	0
4,	3,	1
3,	4,	0
2,	4,	1
7,	2,	1
1,	5,	0
6,	3,	0

9, 2, 0
5, 3, 1
4, 4, 0
8, 2, 1
3, 4, 1
2, 5, 0
1, 5, 1
7, 3, 0
6, 3, 1
9, 2, 1
5, 4, 0
4, 4, 1
8, 3, 0
3, 5, 0
2, 5, 1
1, 6, 0
7, 3, 1
6, 4, 0
9, 3, 0
5, 4, 1
4, 5, 0
3, 5, 1
2, 6, 0
8, 3, 1
1, 6, 1
7, 4, 0
6, 4, 1
5, 5, 0
9, 3, 1
4, 5, 1
3, 6, 0
2, 6, 1
1, 7, 0
8, 4, 0
7, 4, 1
6, 5, 0
5, 5, 1
4, 6, 0
9, 4, 0
3, 6, 1
2, 7, 0
1, 7, 1
8, 4, 1
7, 5, 0
6, 5, 1
5, 6, 0
4, 6, 1
3, 7, 0
9, 4, 1
2, 7, 1
1, 8, 0
8, 5, 0
7, 5, 1
6, 6, 0
5, 6, 1
4, 7, 0
3, 7, 1
2, 8, 0

9, 5, 0
1, 8, 1
8, 5, 1
7, 6, 0
6, 6, 1
5, 7, 0
4, 7, 1
3, 8, 0
2, 8, 1
1, 9, 0
9, 5, 1
8, 6, 0
7, 6, 1
6, 7, 0
5, 7, 1
4, 8, 0
3, 8, 1
2, 9, 0
1, 9, 1
9, 6, 0
8, 6, 1
7, 7, 0
6, 7, 1
5, 8, 0
4, 8, 1
3, 9, 0
2, 9, 1
1, 10, 0
9, 6, 1
8, 7, 0
7, 7, 1
6, 8, 0
5, 8, 1
4, 9, 0
3, 9, 1
2, 10, 0
1, 10, 1
9, 7, 0
8, 7, 1
7, 8, 0
6, 8, 1
5, 9, 0
4, 9, 1
3, 10, 0
2, 10, 1
9, 7, 1
8, 8, 0
7, 8, 1
6, 9, 0
5, 9, 1
4, 10, 0
3, 10, 1
9, 8, 0
8, 8, 1
7, 9, 0
6, 9, 1

5, 10, 0
4, 10, 1
9, 8, 1
8, 9, 0
7, 9, 1
6, 10, 0
5, 10, 1
9, 9, 0
8, 9, 1
7, 10, 0
6, 10, 1
9, 9, 1
8, 10, 0
7, 10, 1
9, 10, 0
8, 10, 1
9, 10, 1

4.1 Ejemplo 1 del Diseño de un Aplicador

En esta parte del capítulo tiene como objetivo realizar el estudio de dos modelos de aplicadores de apertura circular cuando el tejido irradiado es el **Músculo**, y se analizarán dos casos, cuando la constante dielectrica del relleno del aplicador:

- a) tiene un valor de 20.
- b) tiene un valor de 50.

4.1.1 Datos de entrada

Las características del sistema aplicador-tejido para ambos casos están en la siguiente página.

```

DISEÑO DE APLICADOR DE MICROONDAS CILINDRICO
APLICADOR          TEJIDO
PERMITIVIDAD DIELECTRICA  50.0  0.0  52.0 -15.0
PERMEABILIDAD MAGNETICA   1.0  0.0  1.0  0.0
DIAMETRO GUIA (MM.)      11.0  1.0  69.0
NUMERO DE MODOS          5
FREC. DE OPERACION (GHZ.) 2.45

```

 DATOS DE ENTRADA CASO B

```

DISEÑO DE APLICADOR DE MICROONDAS CILINDRICO
APLICADOR          TEJIDO
PERMITIVIDAD DIELECTRICA  20.0  0.0  52.0 -15.0
PERMEABILIDAD MAGNETICA   1.0  0.0  1.0  0.0
DIAMETRO GUIA (MM.)      16.0  1.0  96.0
NUMERO DE MODOS          5
FREC. DE OPERACION (GHZ.) 2.45

```

 DATOS DE ENTRADA CASO A

4.1.2 Datos de salida

Los resultados de la corrida del programa para ambos casos aparecen en las hojas siguientes. Para la construcción de las gráficas se ha elegido los datos correspondientes a la mejor alternativa, en base al menor valor de la magnitud del elemento $S_{22}(1,1)$, que significa el coeficiente de reflexión del modo fundamental TE_{11} , y cuyas gráficas son adicionadas a las que muestran la magnitud del campo eléctrico total en el tejido.

Las gráficas 1 y 2 representan el valor del coeficiente de reflexión del modo fundamental en el aplicador contra el valor de la frecuencia de operación, para el caso a y b respectivamente.

Las gráficas 3, 4, 5, 6 y 7 representan la magnitud del campo eléctrico total contra el valor de la distancia axial en el interior del tejido, para varios planos angulares de valores 0° , 45° , 90° , 135° y 180° y pertenecen a la mejor opción.

DATOS DE SALIDA CASO A

MA.CO.REF FA.CO.REF MA.CO.TRA FA.CO.TRA
 0.54E+00 0.17E+01 0.54E-01 0.52E+00

CAMPO ELECTRICO TOTAL *E-01 V/M

PLANO RADIAL (MM)		0.1		EJE Z (MM)
Ø	CURVA ANGULAR (GRA)	45	90	
			135	
0.44	0.44	0.44	0.44	0.0
0.41	0.41	0.41	0.41	2.5
0.34	0.34	0.34	0.43	5.0
0.30	0.30	0.30	0.30	7.5
0.27	0.27	0.27	0.27	10.0
0.26	0.26	0.26	0.26	12.5
0.25	0.25	0.25	0.25	15.0
0.24	0.24	0.24	0.24	17.5
0.23	0.23	0.23	0.23	20.0

PLANO RADIAL (MM)		2.6		EJE Z (MM)
Ø	CURVA ANGULAR (GRA)	45	90	
			135	
0.45	0.45	0.46	0.45	0.0
0.40	0.40	0.40	0.41	2.5
0.34	0.33	0.34	0.34	5.0
0.30	0.30	0.30	0.30	7.5
0.27	0.27	0.27	0.27	10.0
0.26	0.26	0.26	0.26	12.5
0.25	0.25	0.25	0.25	15.0
0.24	0.24	0.24	0.24	17.5
0.23	0.22	0.22	0.23	20.0

PLANO RADIAL (MM)		5.1		EJE Z (MM)
Ø	CURVA ANGULAR (GRA)	45	90	
			135	
0.41	0.43	0.44	0.43	0.0
0.39	0.38	0.39	0.40	2.5
0.33	0.32	0.32	0.33	5.0
0.29	0.28	0.29	0.29	7.5
0.27	0.26	0.27	0.27	10.0
0.25	0.25	0.25	0.26	12.5
0.24	0.24	0.24	0.25	15.0
0.24	0.24	0.23	0.24	17.5
0.22	0.23	0.22	0.23	20.0

PLANO	RADIAL (MM)	7.6		
0	CURVA ANGULAR (GRA)	45	90	135
0.22	0.23	0.22	0.23	20.0
0.39	0.40	0.40	0.41	0.0
0.36	0.33	0.35	0.38	2.5
0.31	0.29	0.30	0.32	5.0
0.28	0.27	0.27	0.29	7.5
0.26	0.25	0.26	0.27	10.0
0.25	0.24	0.25	0.25	12.5
0.24	0.24	0.24	0.24	15.0
0.23	0.23	0.24	0.23	17.5
0.22	0.22	0.23	0.22	20.0

PLANO	RADIAL (MM)	10.1		
0	CURVA ANGULAR (GRA)	45	90	135
0.33	0.28	0.32	0.36	0.0
0.32	0.26	0.30	0.36	2.5
0.29	0.25	0.27	0.31	5.0
0.27	0.24	0.26	0.28	7.5
0.25	0.23	0.25	0.26	10.0
0.24	0.23	0.24	0.25	12.5
0.23	0.22	0.23	0.24	15.0
0.22	0.22	0.23	0.23	17.5
0.21	0.21	0.22	0.21	20.0

DATOS DE SALIDA CASO B

MA.CO.REF FA.CO.REF MA.CO.TRA FA.CO.TRA
 0.28E+00 0.12E+01 0.45E-01 0.25E+01

CAMPO ELECTRICO TOTAL *E-01 V/M

PLANO RADIAL (MM)		CURVA ANGULAR (GRA)		EJE Z (MM)
0	45	90	135	
0.62	0.62	0.62	0.62	0.0
0.43	0.43	0.43	0.43	2.5
0.32	0.32	0.32	0.32	5.0
0.26	0.26	0.26	0.26	7.5
0.23	0.23	0.23	0.23	10.0
0.20	0.20	0.20	0.20	12.5
0.18	0.18	0.18	0.18	15.0
0.17	0.17	0.17	0.17	17.5
0.15	0.15	0.15	0.15	20.0

PLANO RADIAL (MM)		CURVA ANGULAR (GRA)		EJE Z (MM)
0	45	90	135	
0.61	0.63	0.65	0.63	0.0
0.41	0.40	0.41	0.42	2.5
0.31	0.31	0.31	0.32	5.0
0.26	0.26	0.26	0.26	7.5
0.23	0.22	0.22	0.23	10.0
0.20	0.20	0.20	0.20	12.5
0.18	0.18	0.18	0.18	15.0
0.17	0.17	0.17	0.17	17.5
0.15	0.15	0.15	0.15	20.0

PLANO RADIAL (MM)		CURVA ANGULAR (GRA)		EJE Z (MM)
0	45	90	135	
0.54	0.49	0.56	0.61	0.0
0.38	0.33	0.35	0.39	2.5
0.30	0.28	0.28	0.30	5.0
0.25	0.24	0.24	0.25	7.5
0.22	0.21	0.21	0.22	10.0
0.20	0.19	0.19	0.20	12.5
0.18	0.18	0.18	0.18	15.0
0.16	0.16	0.16	0.16	17.5
0.15	0.15	0.15	0.15	20.0

PLANO RADIAL (MM)		7.6		EJE Z (MM)
CURVA ANGULAR (GRA)				
Ø	45	90	135	
0.41	0.23	0.33	0.47	0.0
0.33	0.26	0.27	0.34	2.5
0.28	0.24	0.25	0.28	5.0
0.24	0.22	0.22	0.24	7.5
0.21	0.20	0.20	0.21	10.0
0.19	0.18	0.18	0.19	12.5
0.18	0.17	0.17	0.17	15.0
0.16	0.16	0.15	0.16	17.5
0.15	0.14	0.14	0.15	20.0

PLANO RADIAL (MM)		10.1		EJE Z (MM)
CURVA ANGULAR (GRA)				
Ø	45	90	135	
0.33	0.23	0.21	0.32	0.0
0.29	0.22	0.23	0.30	2.5
0.26	0.21	0.22	0.26	5.0
0.23	0.20	0.20	0.23	7.5
0.21	0.19	0.18	0.20	10.0
0.19	0.17	0.17	0.18	12.5
0.17	0.16	0.15	0.17	15.0
0.16	0.15	0.14	0.15	17.5
0.14	0.14	0.13	0.14	20.0

FIG. 4.1 COEF. REFLEXION EN APLICADOR
MUSCULO CASO A

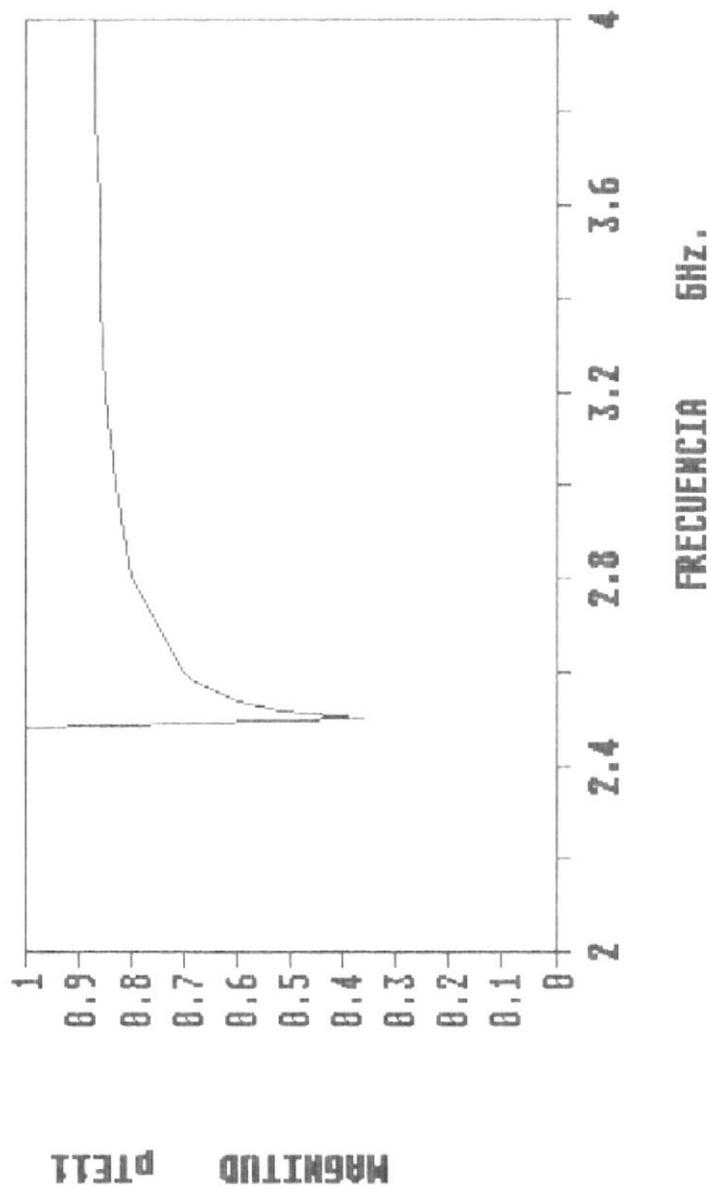


FIG. 4.2 COEF. REFLEXION EN APLICADOR
MUSCULO CASO B

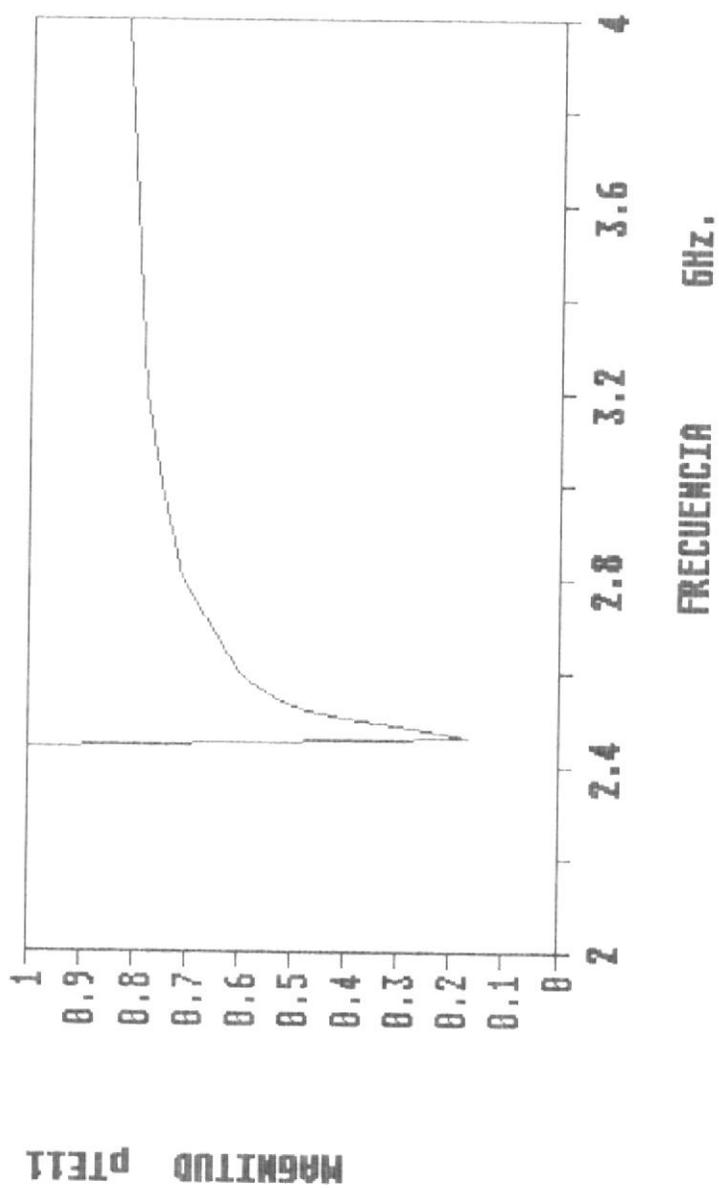


FIG.4.3 CAMPO ELECTRICO EN EL TEJIDO
MUSCULO CASO B. PLANO 8 GRADOS

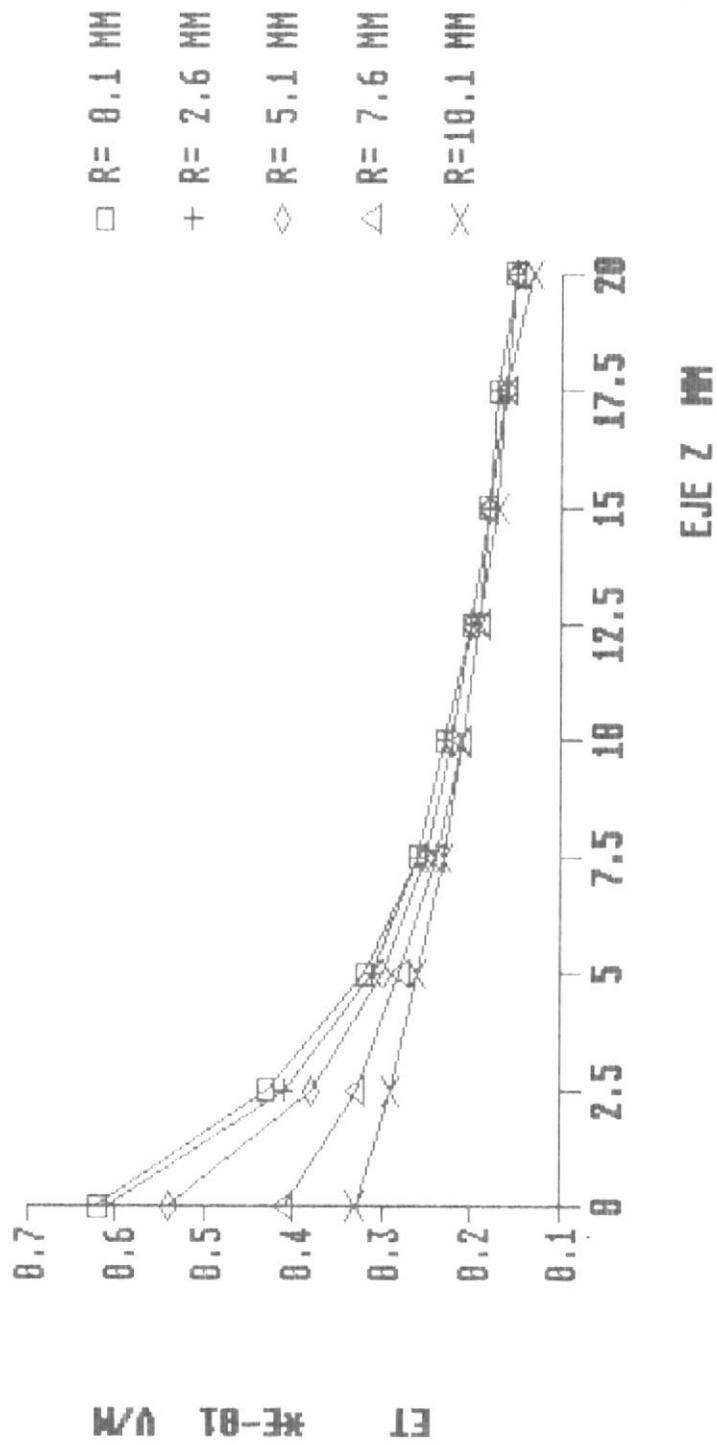


FIG. 4.4 CAMPO ELECTRICO EN EL TEJIDO
MUSCULO CASO B. PLANO 45 GRADOS

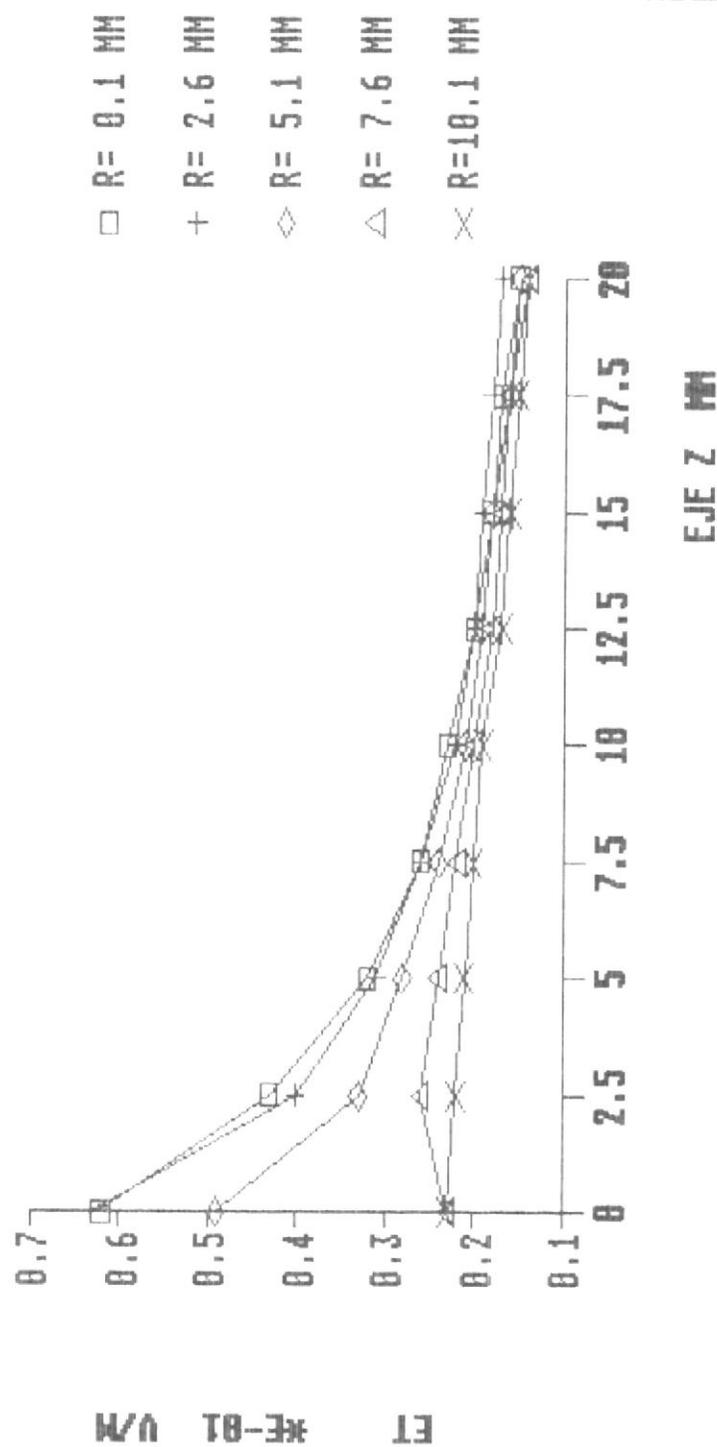
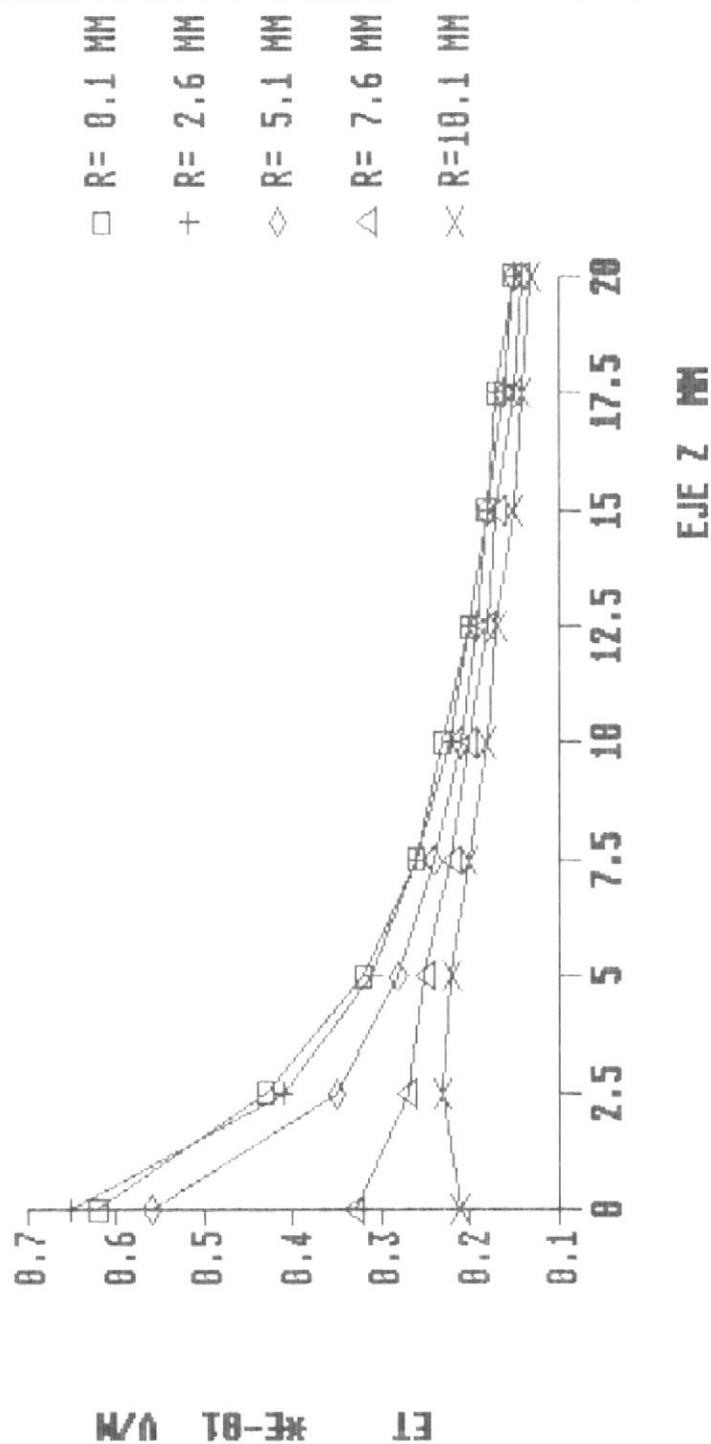


FIG. 4.5 CAMPO ELECTRICO EN EL TEJIDO
MUSCULO CASO B. PLANO 90 GRADOS



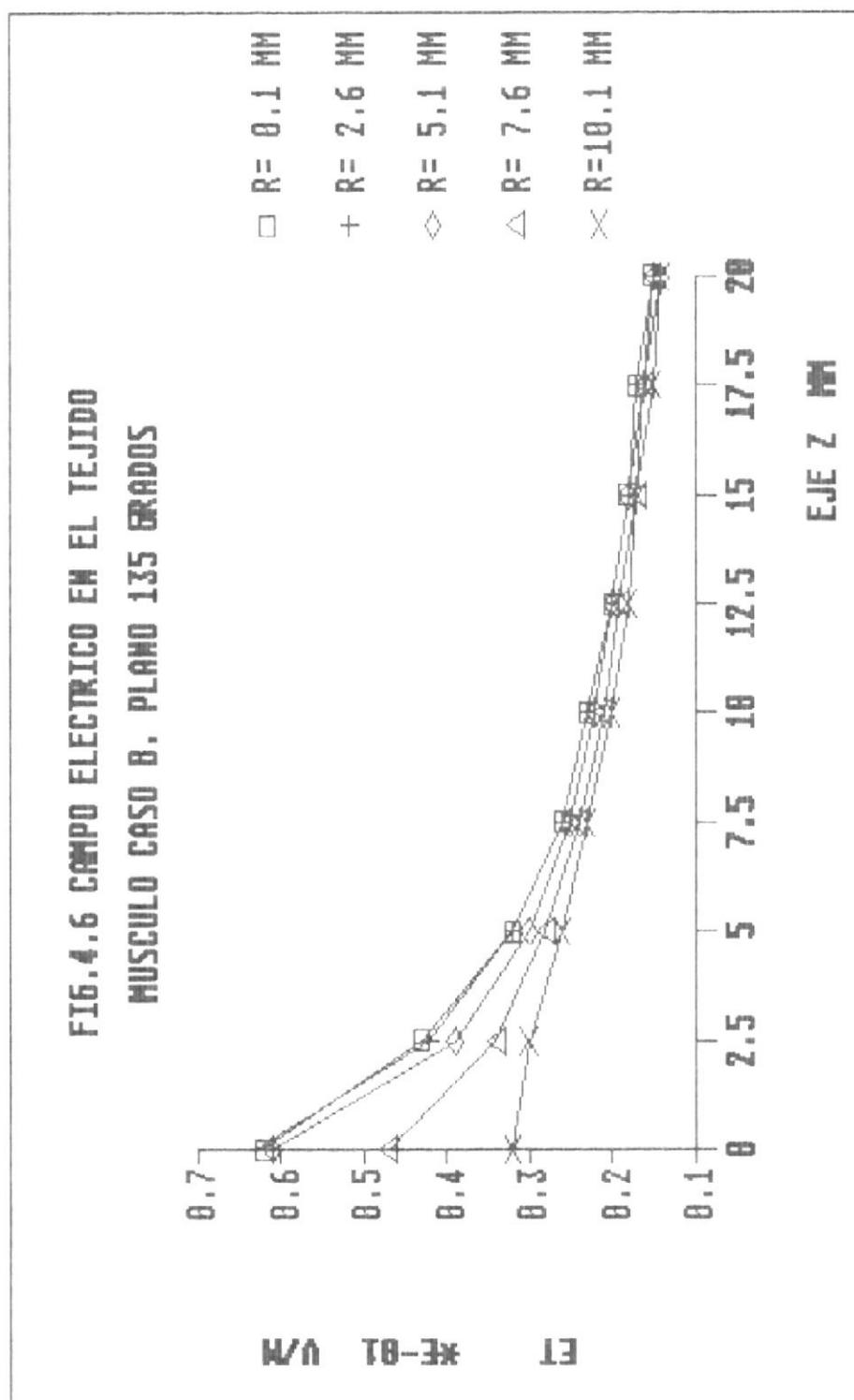
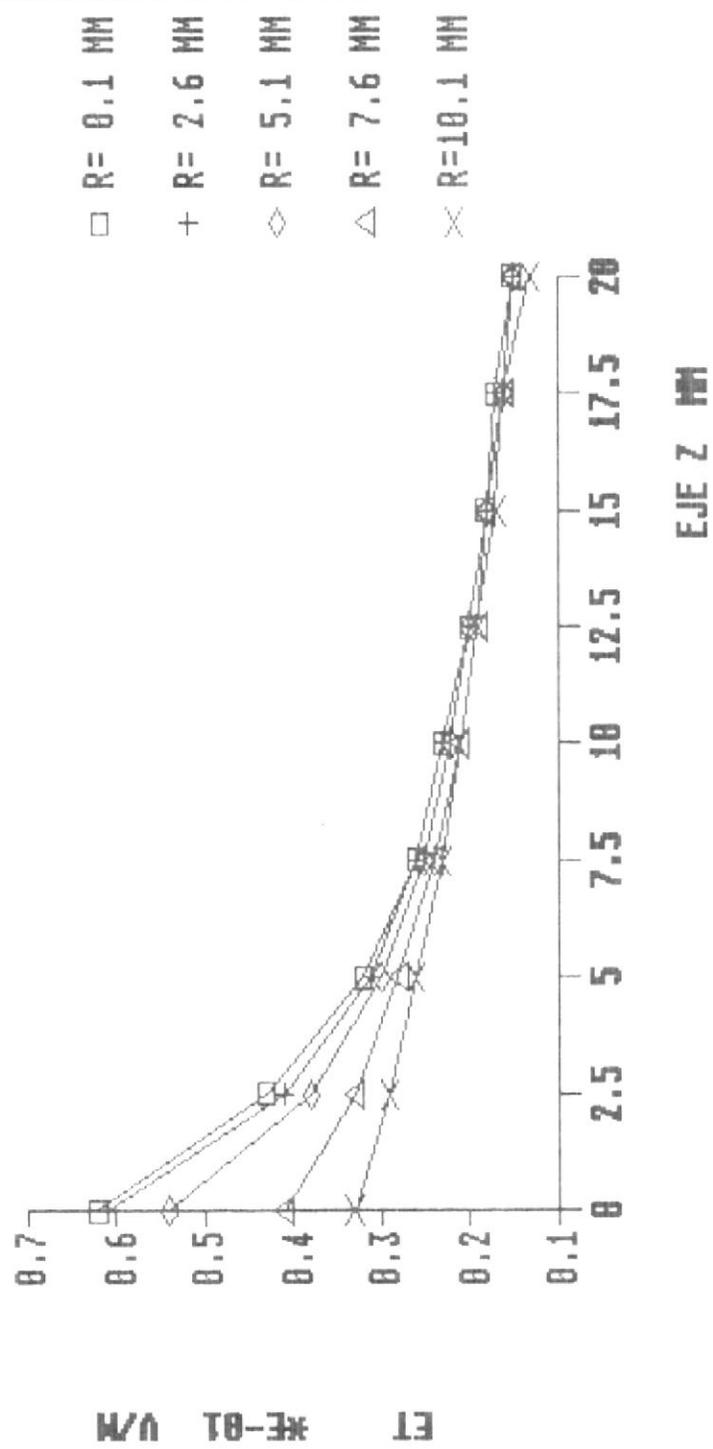


FIG.4.7 CAMPO ELECTRICO EN EL TEJIDO
MUSCULO CASO B. PLANO 180 GRADOS



4.2 Ejemplo 2 del Diseño de un Aplicador

El tejido biológico irradiado en esta ocasión será la Grasa y en forma similar al ejemplo 1, se tiene dos casos de estudio, cuando la permitividad del material relleno en el aplicador es:

- a) de 5 en valor.
- b) de un valor 20.

4.2.1 Datos de entrada.

Los valores de las características del sistema aplicador-tejido para estos casos pueden hallarse en la hoja siguiente.

DATOS DE ENTRADA CASO A

DISEÑO DE APLICADOR DE MICROONDAS CILINDRICO

	APLICADOR		TEJIDO	
PERMITIVIDAD DIELECTRICA	5.0	0.0	5.5	-0.8
PERMEABILIDAD MAGNETICA	1.0	0.0	1.0	0.0
DIAMETRO GUIA (MM.)	32.5		195.0	
NUMERO DE MODOS	5		180	
FREC. DE OPERACION (GHZ.)	2.45			

DATOS DE ENTRADA CASO B

DISEÑO DE APLICADOR DE MICROONDAS CILINDRICO

	APLICADOR		TEJIDO	
PERMITIVIDAD DIELECTRICA	20.0	0.0	5.5	-0.8
PERMEABILIDAD MAGNETICA	1.0	0.0	1.0	0.0
DIAMETRO GUIA (MM.)	16.0		96.0	
NUMERO DE MODOS	5		180	
FREC. DE OPERACION (GHZ.)	2.45			

4.2.2 Datos de Salida

El conjunto de datos obtenidos de la ejecución del programa cuando el tejido sometido a tratamiento es la grasa están situadas en las hojas siguientes. El conjunto de gráficas realizadas pertenecen a la alternativa escogida como la mejor, nuevamente basándose en la magnitud del elemento $S_{22}(1,1)$ de menor valor.

Las gráficas 8 y 9 representan el valor del coeficiente de reflexión del modo fundamental en el aplicador contra el valor de la frecuencia de operación, para el caso a y b respectivamente.

Las gráficas 10, 11, 12, 13 y 14 representan la magnitud del campo eléctrico total contra el valor de la distancia axial en el interior del tejido, de igual manera que en el ejemplo anterior, para varios planos angulares de valores $0, 45, 90, 135$ y 180° y corresponde a la mejor alternativa.

DATOS DE SALIDA CASO A

MA.CO.REF FA.CO.REF MA.CO.TRA FA.CO.TRA
 0.37E+00 -0.61E+00 0.55E-01 -0.23E+00

CAMPO ELECTRICO TOTAL *E-01 V/M

PLANO	RADIAL (MM)	0.1 CURVA ANGULAR (GRA)		EJE Z (MM)
Ø	45	90	135	
0.66	0.66	0.66	0.66	0.0
0.56	0.56	0.56	0.56	5.0
0.48	0.48	0.48	0.48	10.0
0.42	0.42	0.42	0.42	15.0
0.38	0.38	0.38	0.38	20.0
0.35	0.35	0.35	0.35	25.0
0.32	0.32	0.32	0.32	30.0
0.31	0.31	0.31	0.31	35.0

PLANO	RADIAL (MM)	6.1 CURVA ANGULAR (GRA)		EJE Z (MM)
Ø	45	90	135	
0.66	0.67	0.68	0.67	0.0
0.55	0.55	0.55	0.55	5.0
0.47	0.46	0.47	0.47	10.0
0.42	0.41	0.41	0.41	15.0
0.38	0.37	0.37	0.37	20.0
0.35	0.34	0.34	0.35	25.0
0.32	0.32	0.32	0.32	30.0
0.30	0.30	0.30	0.30	35.0

PLANO	RADIAL (MM)	12.1 CURVA ANGULAR (GRA)		EJE Z (MM)
Ø	45	90	135	
0.63	0.64	0.69	0.68	0.0
0.52	0.49	0.51	0.54	5.0
0.45	0.42	0.43	0.45	10.0
0.40	0.38	0.38	0.40	15.0
0.37	0.35	0.35	0.36	20.0
0.34	0.33	0.33	0.34	25.0
0.32	0.31	0.31	0.32	30.0
0.30	0.30	0.30	0.30	35.0

PLANO	RADIAL (MM)	18.1 CURVA ANGULAR (GRA)		EJE Z (MM)
Ø	45	90	135	



BIBLIOTECA

0.54	0.47	0.57	0.63	0.0
0.46	0.39	0.43	0.49	5.0
0.42	0.37	0.37	0.42	10.0
0.38	0.35	0.43	0.38	15.0
0.35	0.33	0.32	0.35	20.0
0.33	0.32	0.31	0.33	25.0
0.31	0.30	0.30	0.31	30.0
0.30	0.29	0.29	0.29	35.0

PLANO	RADIAL (MM)	24.1		EJE Z (MM)
	CURVA ANGULAR (GRA)			
0	45	90	135	
0.44	0.26	0.36	0.51	0.0
0.41	0.29	0.32	0.43	5.0
0.38	0.31	0.31	0.38	10.0
0.36	0.31	0.30	0.35	15.0
0.34	0.30	0.29	0.33	20.0
0.32	0.30	0.29	0.31	25.0
0.31	0.29	0.28	0.30	30.0
0.29	0.28	0.28	0.29	35.0

DATOS DE SALIDA CASO B

MA.CO.REF FA.CO.REF MA.CO.TRA FA.CO.TRA
 0.57E+00 -0.75E+01 0.53E-01 -0.34E+01

CAMPO ELECTRICO TOTAL *E-01 V/M

PLANO RADIAL (MM)		0.1		EJE Z (MM)
Ø	CURVA ANGULAR (GRA)	45	90	
			135	
0.46	0.46	0.46	0.46	0.0
0.43	0.43	0.43	0.43	5.0
0.34	0.34	0.34	0.34	10.0
0.31	0.31	0.31	0.31	15.0
0.29	0.29	0.29	0.29	20.0
0.29	0.29	0.29	0.29	25.0
0.28	0.28	0.28	0.28	30.0
0.28	0.28	0.28	0.28	35.0

PLANO RADIAL (MM)		6.1		EJE Z (MM)
Ø	CURVA ANGULAR (GRA)	45	90	
			135	
0.41	0.42	0.47	0.46	0.0
0.40	0.39	0.40	0.42	5.0
0.33	0.33	0.33	0.34	10.0
0.29	0.30	0.30	0.31	15.0
0.28	0.29	0.29	0.29	20.0
0.28	0.28	0.28	0.28	25.0
0.28	0.28	0.28	0.28	30.0
0.28	0.28	0.27	0.28	35.0

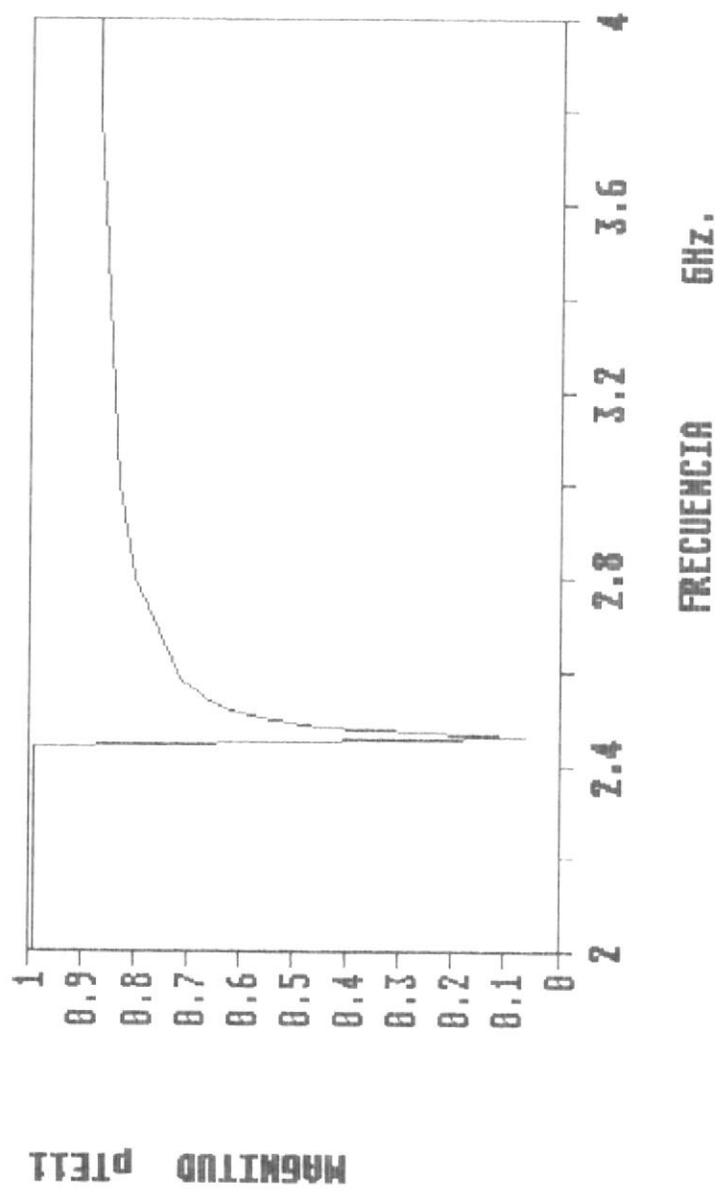
PLANO RADIAL (MM)		12.1		EJE Z (MM)
Ø	CURVA ANGULAR (GRA)	45	90	
			135	
0.37	0.29	0.35	0.39	0.0
0.35	0.30	0.33	0.37	5.0
0.31	0.29	0.30	0.32	10.0
0.29	0.28	0.29	0.30	15.0
0.28	0.27	0.28	0.28	20.0
0.28	0.27	0.27	0.27	25.0
0.27	0.27	0.26	0.27	30.0
0.27	0.27	0.26	0.27	35.0

PLANO RADIAL (MM) 18.1

CURVA ANGULAR (GRA)				EJE Z (MM)	
Ø	45	90	135		
0.31	0.28	0.31	0.33	0.0	
0.30	0.26	0.29	0.32	5.0	
0.28	0.26	0.27	0.30	10.0	
0.27	0.26	0.26	0.28	15.0	
0.27	0.25	0.25	0.27	20.0	
0.26	0.25	0.25	0.26	25.0	
0.26	0.25	0.24	0.25	30.0	
0.26	0.25	0.24	0.25	35.0	

PLANO RADIAL (MM) 24.1				EJE Z (MM)	
CURVA ANGULAR (GRA)					
Ø	45	90	135		
0.27	0.24	0.26	0.27	0.0	
0.26	0.24	0.24	0.27	5.0	
0.25	0.24	0.25	0.26	10.0	
0.25	0.23	0.23	0.26	15.0	
0.24	0.23	0.22	0.25	20.0	
0.24	0.23	0.21	0.24	25.0	
0.24	0.22	0.21	0.23	30.0	
0.23	0.22	0.20	0.23	35.0	

FIG.4.8 COEF. REFLEXION EN APLICADOR
GRASA CASO A



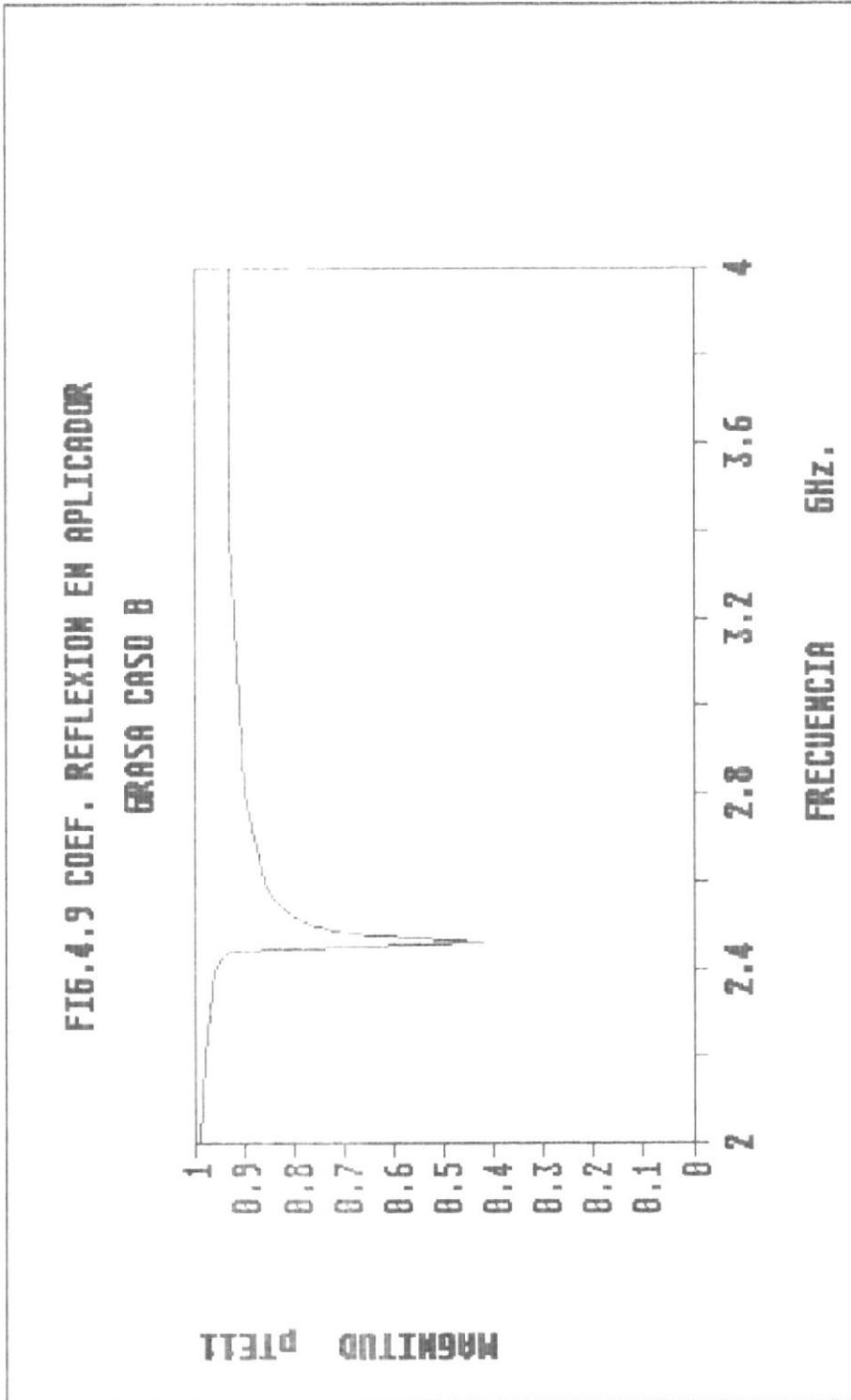


FIG.4.18 CAMPO ELECTRICO EN EL TEJIDO
GRASA CASO A. PLANO 8 GRADOS

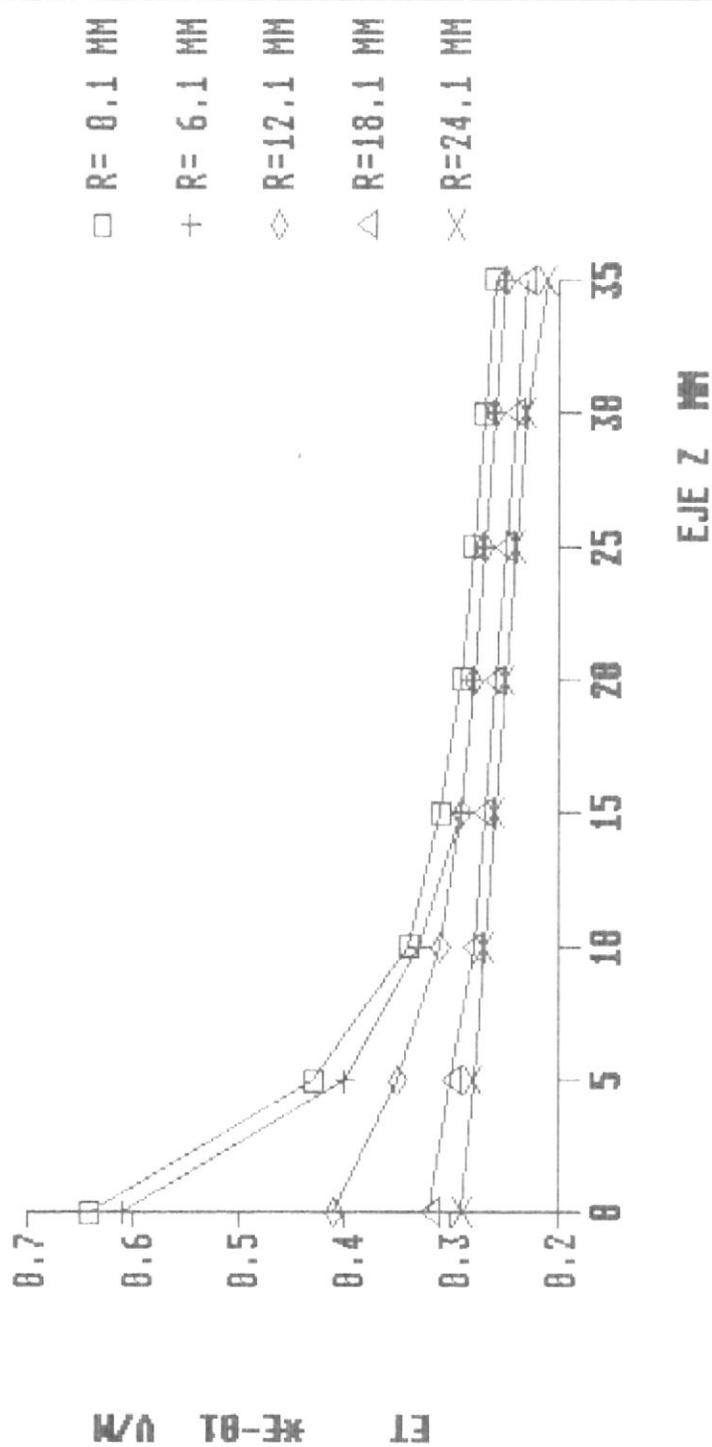
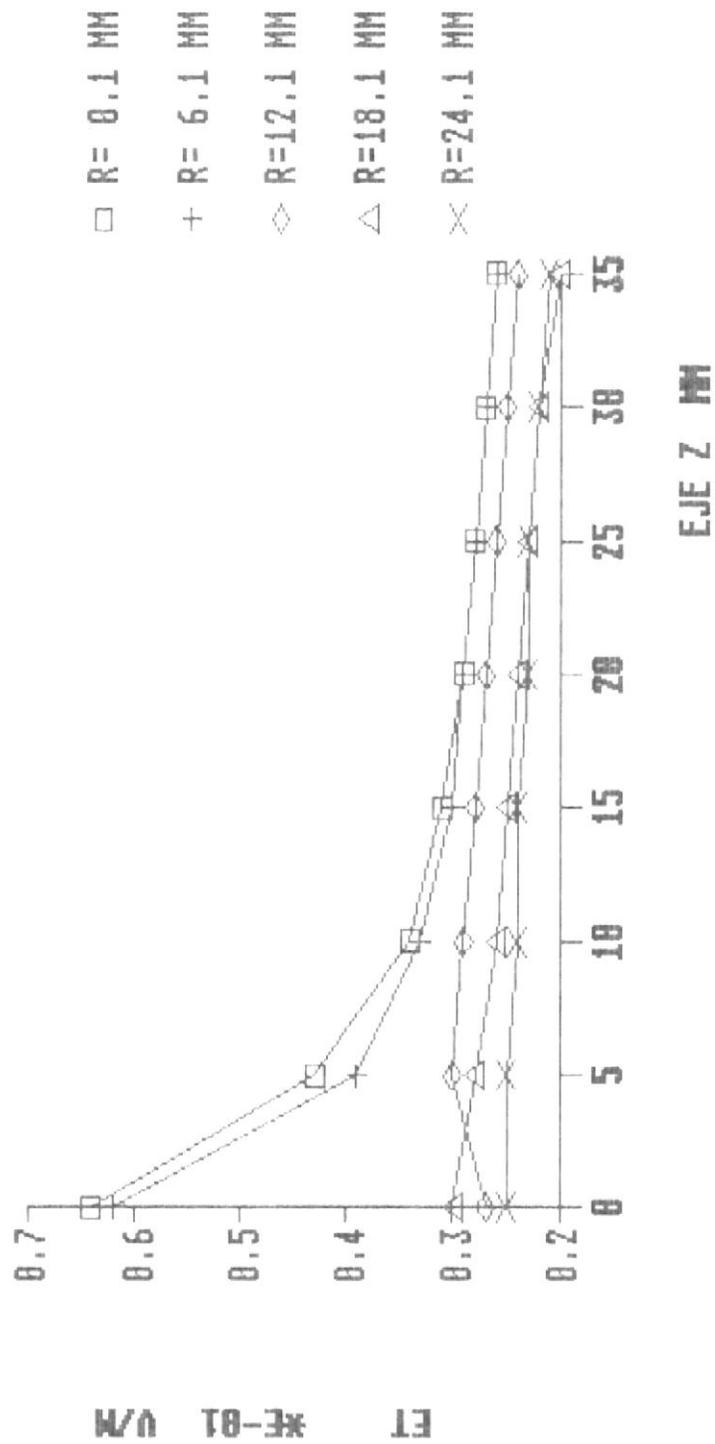


FIG.4.11 CAMPO ELECTRICO EN EL TEJIDO
GRASA CASO A. PLANO 45 GRADOS



**FIG. 4.12 CAMPO ELECTRICO EN EL TEJIDO
GRASA CASO A. PLANO 90 GRADOS**

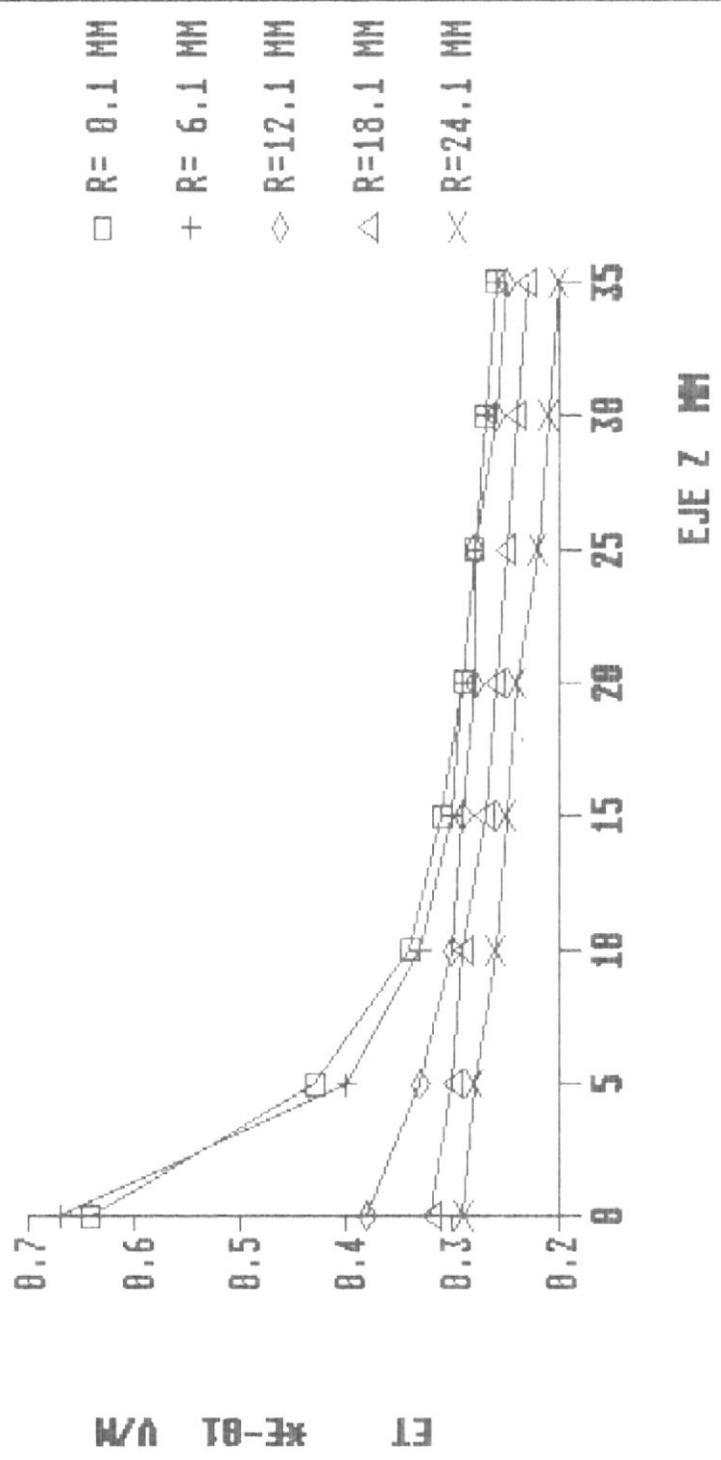


FIG.4.13 CAMPO ELECTRICO EN EL TEJIDO
GRASA CASO A. PLANO 135 GRADOS

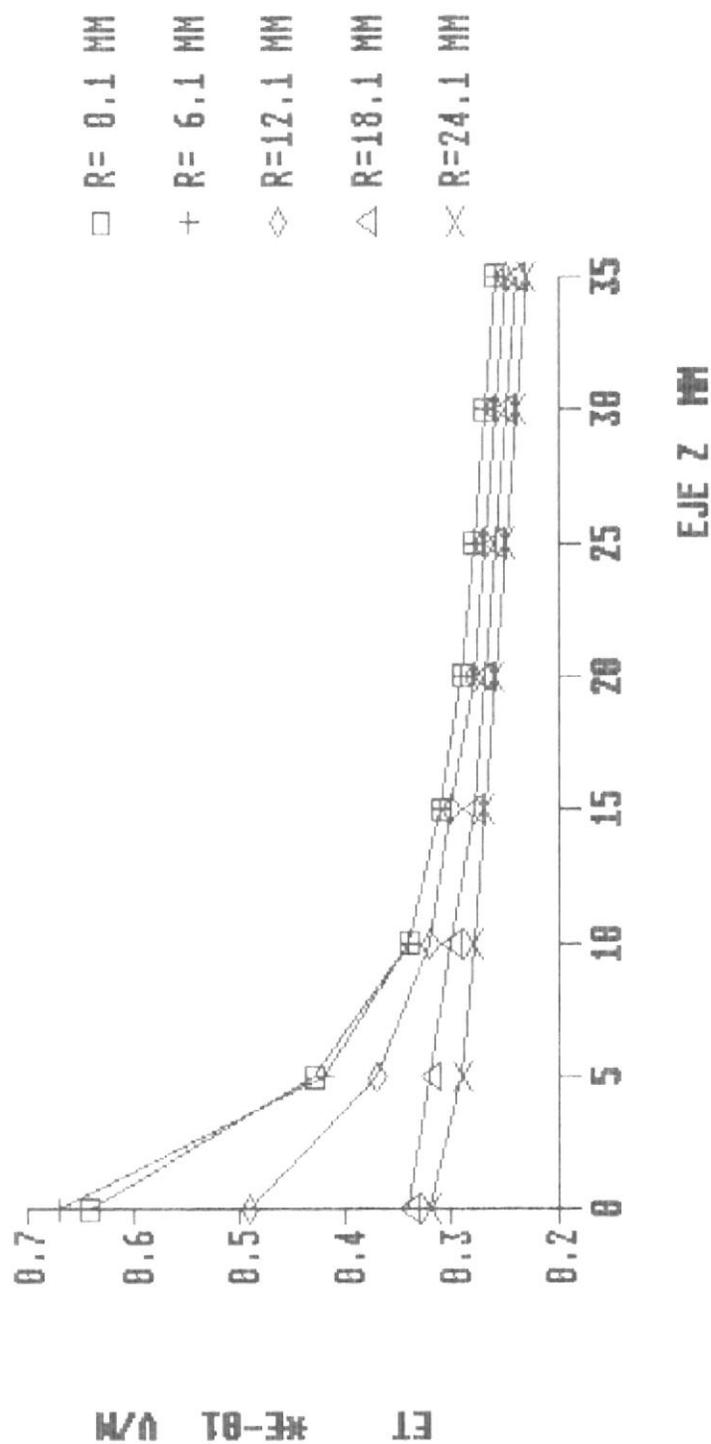
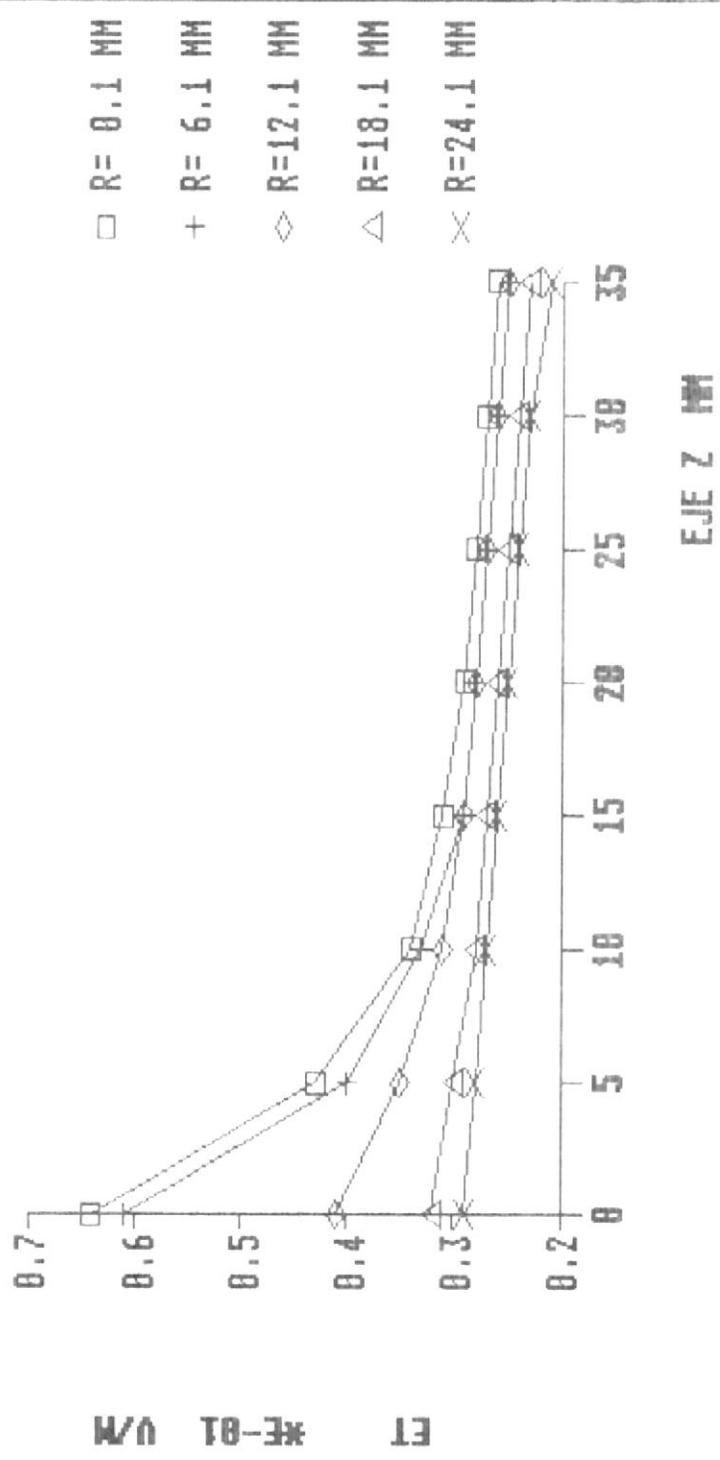


FIG. 4.14 CAMPO ELECTRICO EN EL TEJIDO
GRASA CASO A. PLANO 180 GRADOS



4.3 Análisis de Resultados

Del conjunto de datos de salida del programa cuando el tejido irradiado, con microrondas de frecuencia de 2.45 GHz., es el **Músculo** se tiene que:

- En el caso **a**, la magnitud del coeficiente de reflexión del modo fundamental TE_{11} mayor en relación al del caso **b**.
- De forma paralela los valores del campo eléctrico total en el tejido son menores en caso **a** que en el **b**.
- Lo cual nos conduce a afirmar que el aplicador de la alternativa **b** es el diseño más óptimo.
- La comparación de las gráficas 1 y 2 correspondientes al coeficiente de reflexión del modo fundamental TE_{11} , elemento $S_{22}(1,1)$ demuestran con mayor claridad dicha afirmación.

En forma similar, para el ejemplo 2 cuando el tejido irradiado (a 2.45 GHz.) es la **Grasa** sin dificultad puede deducirse que la alternativa **a** es de la mejor opción del diseño.

Como conclusión se subraya la peculiaridad que se nota en los resultados obtenidos tanto para el primero como para el segundo ejemplo y que inclina a resaltar el mejor acople entre el aplicador y el tejido cuando la permitividad del relleno dielectrico es de valor cercano a la del tejido.

CAPITULO V

APLICACIONES

La utilización de máxima importancia que tienen los aplicadores electromagnéticos y ultrasónicos en el área Biomédica es sin lugar a dudas el Tratamiento del Cáncer considerada por casi dos centurias como la enfermedad responsable de un alto índice de mortalidad humana a nivel mundial.

El objetivo de este capítulo es anotar varias ideas y conceptos básicos acerca de la técnica más avanzada con que cuenta la ciencia para eliminar las formaciones tumorales, conocida como **Hipertermia**, consistente en la aplicación de calor a los tejidos afectados, cuando se hallan sometidos a cierto tipo de terapia. En concreto versa sobre el tratamiento Hipertermico del Cáncer con Microondas.

5.1 Introducción

En nuestros tiempos los científicos cuentan con tres tipos de estrategias en favor de la lucha contra esta temible enfermedad: Cirugía, Rayos X, y Quimioterapia.

De las investigaciones de fines del siglo anterior se conoce sin embargo que ha sido notorio el interés por estudiar el efecto que el calor ejerció en la regresión parcial o total de los tumores, pero sucedió que en épocas pasadas el calentamiento de tejidos biológicos no pudo ser llevada controladamente, por muchas limitaciones tanto en conocimientos y tecnología.

Se cree que el primero en trabajar con microondas en frecuencias de Banda L, junto a la Radioterapia fue Denier en 1936, y un año más tarde Brunner Ornzsteini y Randa informaron resultados de una terapia similar logrando eliminar algunos tejidos cancerosos en el cuerpo humano.

En 1967 Cavliere sometió a 22 pacientes con cáncer en las extremidades a un tratamiento hipertermico regional, consiguiendo elevar la temperatura de los tumores entre 41.5 y 43.5 °C. por varias horas, resultando 13 curaciones 3 amputaciones, 6 decesos y en el resto no se pudo evaluar las consecuencias del proceso terapeutico.

Con el transcurso del tiempo y gracias al titánico esfuerzo de una multiplicidad de profesionales e instituciones a nivel internacional, hoy en día los

científicos comentan de la alta posibilidad de salvar vidas, cuando ciertas clases de neoplasias son diagnosticadas en sus primeras etapas.

En la actualidad la aplicabilidad clínica de la Hipertermia es analizada por muchas organizaciones alrededor del mundo, por ejemplo el National Cancer Institute en los Estados Unidos quien realizó una Conferencia sobre Hipertermia en 1984.

Cabe resaltar que la opinión general de los oncólogos concuerda en la magnífica oportunidad que esta terapia conjunta (Hipertermia y Rayos X) ofrece al porvenir de la ciencia antineoplásica.

Adicional información histórica sobre este tratamiento se hallará en (6) y (9).

5.2 Usos en Biomedicina: Hipertermia

Esta estrategia coadyuvante a la Quimioterapia, Cirugía y Rayos X, consiste en sobrecalentar controladamente al tejido viviente, en un rango de temperatura entre 42 y 45 °C.

Existen varios hechos biológicos que respaldan los resultados beneficios del tratamiento hipertermico

de los fenómenos neoplásicos, entre ellos son:

- Las formaciones tumorales se caracterizan por tener una pobre circulación de sangre que no permite una buena disipación de calor en ellas lo que se traduce en una gran sensibilidad al calor.
- La pobre circulación de sangre, a su vez es causante de un bajo nivel de pH en las células malignas, así su sensibilidad al calor aumenta.
- La termotolerancia entre las células normales y las cancerosas es relativamente comparable, no obstante el tratamiento hipertermico fraccionado produce la eliminación de las últimas en altísimo grado respecto a las primeras que circundan el tumor.
- La sinergia que ocurre entre el calor y los rayos X, un efecto poderosamente útil, es quien determina en forma radical las ventajas que ofrece el tratamiento hipertermico de tejidos cancerosos con Radioterapia en relación a los tratamientos convencionales que solo usan drogas rayos X o técnicas quirúrgicas. Ver ref. (9).

Esto en adición a que, al menos hasta ahora, no han aparecido agentes cancerígenos o mutogénicos posteriores al proceso, hacen de dicha estrategia conjunta una atractiva arma para combatir las afecciones neoplásicas.

La clase de tratamiento hipertermico a escoger está determinado principalmente por varios factores como la geometría, ubicación, profundidad y tipo de tumor a destruir; pueden aplicarse métodos ultrasónicos, de radiofrecuencia, de microondas, de carácter externo e interno.

Basicamente las técnicas utilizadas entran en dos categorías: Hipertermia de cuerpo entero y por inducción hipertermica regional o local.

En Hipertermia de tumores de ubicación localizada, ver (6), existen 5 formas de terapias:

- por calentamiento resistivo.
- por baño regional.
- por calentamiento ultrasónico.
- por calentamiento con radiofrecuencia.
- por calentamiento con microondas.

Las tres últimas ofrecen medios no invasivos de

inducción hipertermica, pero poseen ciertas situaciones de ventaja y desventaja, la ultrasónica por ejemplo carece de capacidad de atravesar cavidades huecas en los tejidos como la boca, pulmón, etc. Las microondas de una frecuencia dada producen un bajo grado de absorción de energía en los tejidos de pobre contenido de agua, (hueso grasa), en comparación en los de alto contenido de líquido, (músculo, piel, pulmón, hígado); Además la profundidad de penetración de la energía es mayor en tejidos de poco contenido de agua, que en los de rico porcentaje.

Algo de suma importancia es determinar la eficiencia del tratamiento hipertermico, para lo cual debe ponerse a consideración dos problemas:

- Cómo calcular y predecir los patrones de energía vertida sobre el tejido ?.
- Cómo diseñar un sistema de control capaz de mantener, en el tejido irradiado, una temperatura estable en el tiempo ?.

Las respuestas a ellas exigen un conjunto de actividades realmente complicadas en ingeniería fuera del alcance del presente trabajo, pero a continuación se dará, en resumidas cuentas, una idea de su solución.

En el estudio de un nuevo sistema de aplicadores por regla general, se emplean materiales que asemejan al tejido biológico en características tales como la permitividad dieléctrica, etc., que en realidad representa un modelo físico del tejido.

Aquellos prototipos son denominados 'phantoms' y su utilización tiene como objetivo ayudar a conocer varios fenómenos que suceden en la materia viviente expuesta a energía electromagnética y ultrasónica.

Se puede determinar por ejemplo la distribución espacial del campo electromagnético inducido en el interior de tejidos vivos, analizando la respuestas de los modelos físicos, y aprovechando las ventajas de los sistemas de adquisición de datos junto con el estudio de modelos matemáticos, las pruebas arrojan resultados confiables que alientan al posterior uso real de los aplicadores diseñados.

Es primordial que los sistemas hipertermicos cumplan con ciertos protocolos y especificaciones clinicas en busca de brindar la debida seguridad en el proceso, a efectos de ejercer cuidadosamente el control de la temperatura a la que se somete al paciente.

Varios de los requerimientos a satisfacer en la construcción del equipo son para proveer:

- medición, calibración electrónica de temperatura.
- calibración del nivel de energía a suministrar.
- monitoreo del SAR y potencia neta en el tejido.
- determinación de la distribución del SAR.
- prevención de situaciones de peligro.

Se tiene que para realizar el acoplamiento de energía entre la fuente generadora y el tejido, son utilizadas las unidades aplicadoras, frecuentemente el generador de microondas alimenta al aplicador y este último transmitirá la energía al tejido. El sistema aplicador-tejido que emplea dispositivos de uso externo, (guías de onda), puede tener dos configuraciones:

- ser de contacto directo, nuestro caso de estudio.
- tener una separación, ('bolus') de aire, agua u otro material dieléctrico.

Para finalizar la fig. 5.1 ilustra el diagrama de bloques de un sistema hipertermico que opera sobre una formación tumoral en las glándulas mamarias. En la ref. (6) sugiere otras alternativas del sistema.

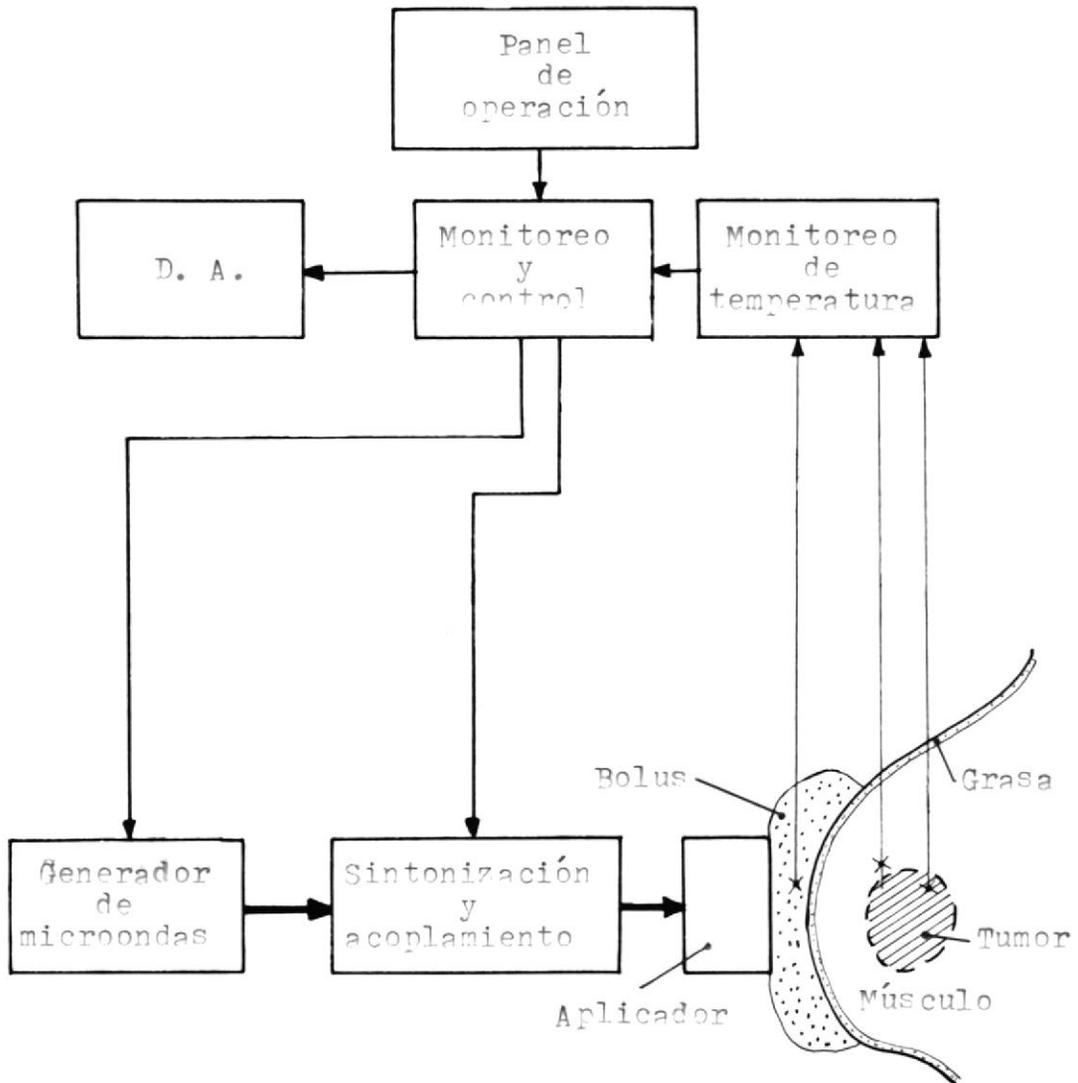


FIG. 5.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA HIPERTERMICO APLICADO AL TRATAMIENTO DE TUMORES.

5.2.1 Breve estudio de los tejidos biológicos sometidos a campos electromagnéticos

Cuando la materia viva es expuesta a la energía electromagnética no ionizante (no permite la liberación de cargas libres en los átomos), se producen en su interior dos fenómenos: térmicos y no térmicos.

Los primeros se manifiestan mediante la disipación de energía calorífica inducida en el tejido biológico, y su efecto es inmediato. Los otros en cambio, se presentan a través de alteraciones y mutaciones de las células, su aparición es detectada a largo plazo.

Los efectos térmicos en los tejidos obedecen a ciertos mecanismos que gobiernan su comportamiento macromolecular y celular acorde a (11) aquellos se basan en los siguientes factores:

- contenido de agua de los tejidos.
- soluciones proteínicas de las células.
- acción de la membrana celular.

De alguna forma, que no nos compete analizar ellos son los que determinan las características eléctricas y térmicas de los tejidos.

Se menciona por ejemplo que aquellos tejidos ricos en agua presentan una alta constante dieléctrica, no así los de bajo contenido acuoso, y sucede todo lo contrario con la resistividad, (inverso de la conductividad).

La fig. 5.2 muestra la dependencia de la permitividad con respecto a la frecuencia para tejidos de alto y bajo contenido de agua, y en la fig. 5.3 se ha puesto una tabla de permitividades para muchos tejidos, tomada de la ref. (11).

Una medida de la absorción de energía en el tejido puede determinarse mediante un parámetro llamado **Tasa de Absorción Específica** siglada **SAR** (Specific Absorption Rate), en cuyo cálculo hay la posibilidad de emplear una multiplicidad de métodos que no va al caso mencionar, por lo pronto se presentarán dos fórmulas:

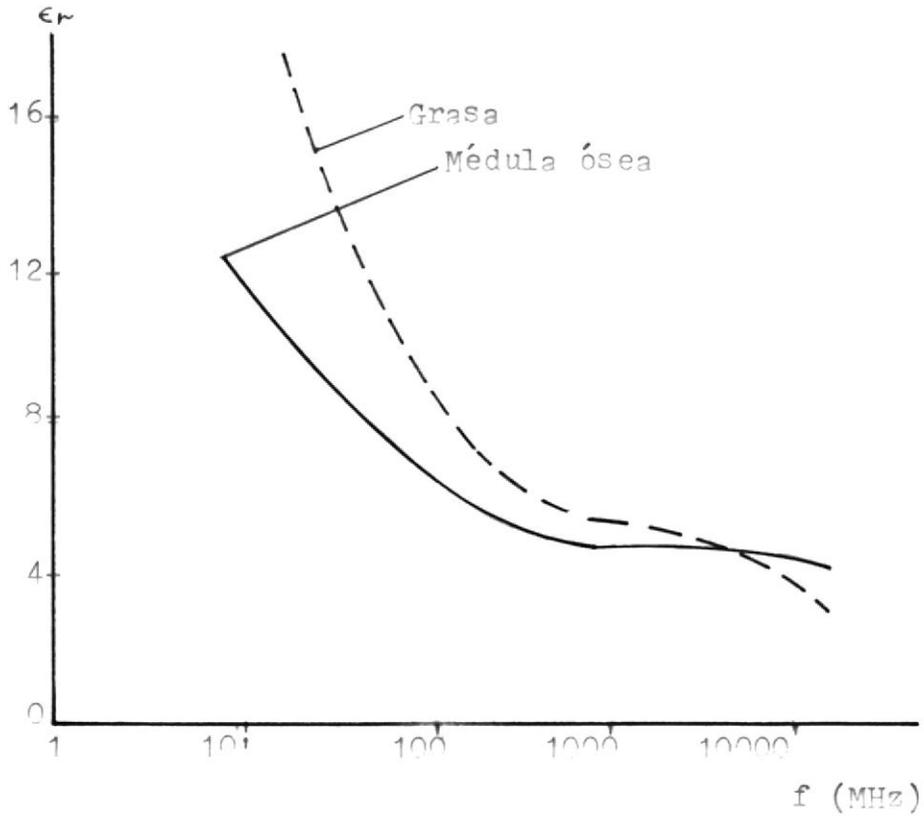
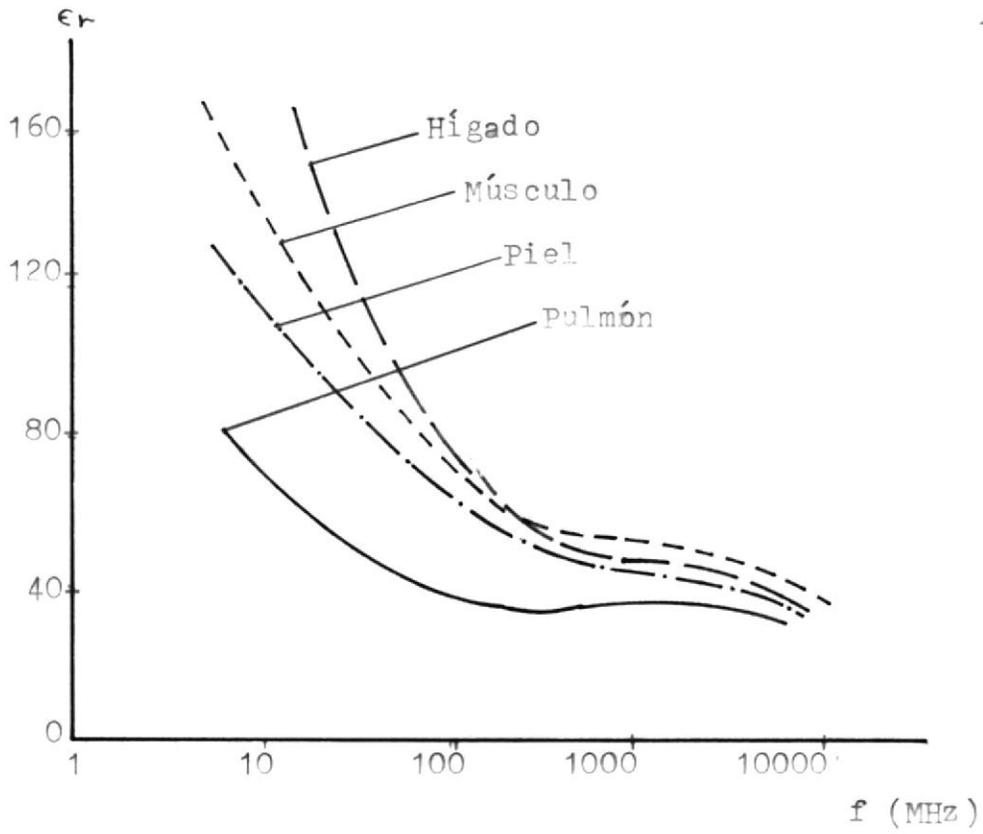


FIG. 5.2 PERMITIVIDAD RELATIVA DE TEJIDOS SEGUN SU CONTENIDO DE AGUA.

constante dieléctrica de tejidos a 37°C
frecuencia (MHz)

	50	100	200	400	700	1000	3000
Músculo	85-97	71-76	56	52-54	52-53	49-52	45-48
Músc. Corazón			59-63	52-56	50-55		
Hígado	88-93	76-79	50-56	44-51	42-51	46-47	42-43
Riñón	119-132	87-92	62	53-55	50-53		
Pulmón			35	35	34		
Grasa	11-13		4.5-7.5	4-7		5.3-7.5	3.9-7.2
Médula ósea	6.8-7.7					4.3-7.3	4.2-5.8
Conductividad (mmhos/cm) a 37°C							
Músculo	6.80-8.85		9.52-10.5	11.1-11.8	12.7-13.7	12.7-13.3	21.7-23.3
Músc. Corazón			8.7-10.5	10.5-11.8	10.5-12.8		
Hígado	5.13-5.78	5.59-6.49	6.67-9.09	7.69-9.52	8.7-11.8	9.43-10.2	20.0-20.4
Riñón	6.9-11.1		11.1	11.8	1.3-1.32		
Pulmón	2.22-3.85		6.25	7.14	7.69		
Grasa	0.40-0.59		0.29-0.95	0.36-11.1		0.83-1.49	1.11-2.27
Médula ósea	0.20-0.36					0.43-1.0	1.16-2.25

FIG. 5.3 Tabla de Permitividades Relativas y Conductividades de Tejidos.
Schwan-Foster (11)

$$\text{SAR} \sim C * (\text{DT}/\text{Dt})$$

donde:

C es la constante de calor específico en Joules/Kg.

DT/Dt es la pendiente instantánea de la Temperatura vs tiempo, en °C/s.

SAR tasa de absorción en W/Kg.

Expresión válida para situaciones experimentales tomada de (6).

$$\text{SAR} \sim \sigma * |E_t|^2 / (2 * \delta)$$

donde:

σ es la conductividad en mhos/m.

δ la densidad del tejido en Kg/m³.

E_t el campo eléctrico total en V/m.

Ecuación válida para nuestro estudio teórico tomada de (3).

La **profundidad de penetración** de la energía en los tejidos es otro parámetro de interés en toda aplicación, conforme a (6) es:

$$D = (\epsilon_r)^{1/2} / (120 \pi * \sigma)$$

donde:

σ es la conductividad del tejido.

ϵ_r es su permitividad relativa.

D profundidad de penetración en m.

La constante dieléctrica y la conductividad son en esencia los que priman en la determinación del calor generado en el tejido, y el SAR junto a la profundidad de penetración definen la cantidad de energía absorbida por el tejido.

5.3 Otras Aplicaciones

Los aplicadores de microondas en especial están siendo incluidos en la realización de una serie de experimentos con propósitos biomedicos, fuera del tratamiento del cáncer.

El afán de los científicos es de lograr resolver varios problemas que tiene la Biomedicina, por ejemplo hace algún tiempo se estudia en la posibilidad de utilizar las microondas para

efectuar mediciones de temperatura en partes del cuerpo de difícil acceso, por medios no invasivos a través del imaginamiento de los tejidos. Ver (4) y (5).

Los resultados obtenidos hasta ahora no significan un éxito contundente, sin embargo las pruebas llevadas a cabo abren una perspectiva bastante buena, de que en un futuro cercano se pueda sensar la temperatura o detectar los movimientos del cuerpo, con imágenes de una resolución más aceptable de la que se ha logrado hasta ahora.

Con el objetivo de sensar temperatura los entendidos implementaron equipos de Termografía con microondas, la cual ha sido probada positivamente en el control de temperatura en sistemas de hipertermia clínica, pero aquellos adolecen de varios defectos, como la pobre sensibilidad que muestra el sistema al registro de temperatura, otra falla es que únicamente la temperatura superficial del cuerpo puede ser detectada.

A pesar de esto en la mayoría de los estudios casuísticos las 'mediciones' hechas cuentan con buena resolución y proveen una exactitud de aproximadamente 0.1°C , (en termografía).

Luego se analiza el imaginamiento de tejidos mediante Tomografía con microondas, proceso en el cual es aprovechada la permitividad compleja local de los tejidos y sirviéndose de los sistemas computarizados de adquisición de datos se reconstruyen imágenes del tejido, pero en la actualidad estas técnicas ofrecen imágenes de baja resolución.

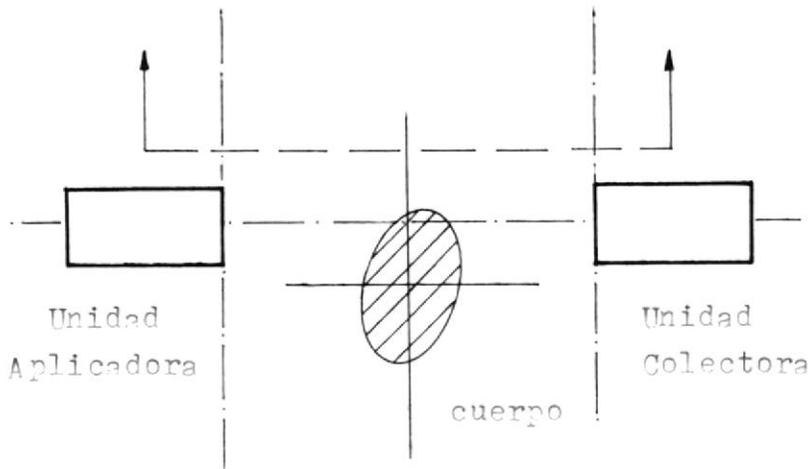
Los procesos tomográficos con microondas desarrollados son de dos tipos:

- Tomografía por Transmisión.
- Tomografía por Difracción.

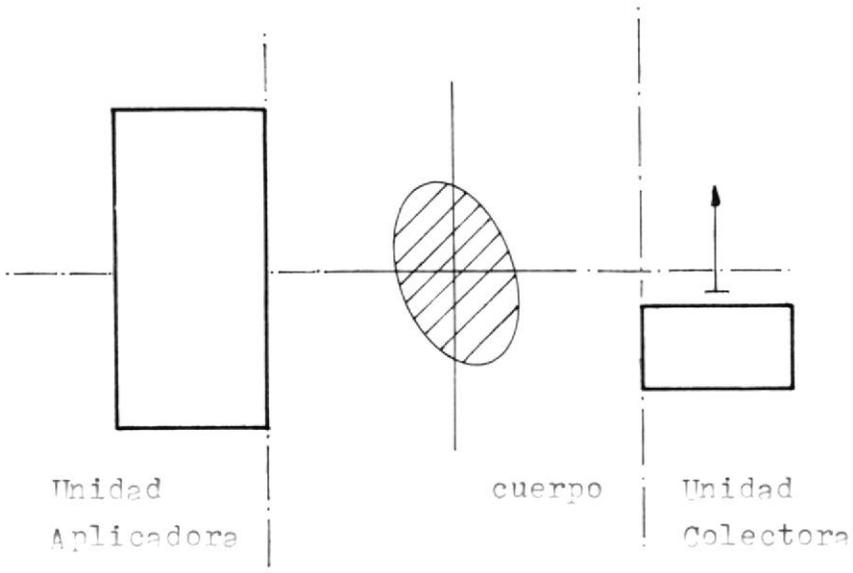
En la figura 5.4a y 5.4b se muestran el principio básico de operación de ambos.

En la primera se tiene que el cuerpo, cuya temperatura de desea sensar, se mantiene en una posición fija entre el aplicador y el colector.

La unidad aplicadora y la colectora de microondas realizan un movimiento de barrido en forma paralela y simultánea.



a) Tomografía por Transmisión



b) Tomografía por Difracción

FIG. 5.4 PRINCIPIOS BASICOS DE TOMOGRAFIA
CON MICROONDAS.

Bolomey, Jofre y Peronnet (4)

Equipos de frecuencia modulada son utilizados para enviar la energía entre el aplicador y el colector buscando el camino más directo. Al colector llega la energía que ha atravesado el cuerpo, es decir transmitida.

El mecanismo de tomografía por difracción difiere totalmente del anterior, por ejemplo el barrido sólo es efectuado por la antena colectora, mientras que el aplicador y el cuerpo permanecen en posición fija. Al colector llega la fracción de energía que se refleja en el cuerpo.

Se recalca que las imágenes obtenidas mediante los procesos tomográficos están íntimamente relacionadas al valor de la permitividad compleja del tejido, la que a su vez mantiene mutua dependencia con su temperatura para una frecuencia de operación dada.

El intento por mejorar la resolución en el imaginamiento de tejidos para aplicarlo en la detección de su temperatura, se ve frenado por muchos inconvenientes, pero sin embargo, si vale la pena anotar que amerita la continuidad en las investigaciones, varias ventajas que se han logrado, algunas son:

- el proceso es de característica inofensiva cuando los niveles de exposición ofrecen suficiente seguridad, para una densidad de potencia menor a 1 mW/cm^2 .
- un presupuesto hecho brevemente indica menor costo que el de los metodos convencionales.
- ofrece mayor rapidez para determinar las 'mediciones' de temperatura, gracias a la versatilidad de los equipos computarizados.
- capacidad de sensar la temperatura en zonas del cuerpo humano no comunmente accesibles.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la realización de esta tesis se concluye:

- El trabajo expone el estudio de discontinuidades transversales en guías de onda, mediante el Análisis Modal, centrándose de manera especial en el caso de aplicadores de apertura circular.
- La potencialidad del desarrollo multimodal radica en su flexibilidad para poder ser aplicada a casos en que las discontinuidades ocurran en guías de cualquier geometría, así por ejemplo en las de sección rectangular, circular etc..
- Para el caso de estudio, en guías de apertura circular, se llegó a determinar que el Análisis Modal no provee una solución si los modos TE_{0m} y los TM_{0m} no son excluidos del cálculo, porque impiden la obtención de la Inversa de una Matriz cuando en las matrices X, P y Q aparecen filas y/o columnas de ceros. Para corregir esta omisión de modos es necesario utilizar un número de modos del mayor valor posible.

En base a la culminación del presente informe se dá la pauta para que en posteriores ocasiones se avance más en la investigación en tan importante tema, y a manera de recomendación se citará algunas actividades a realizar:

- Considerar una constitución para el tejido biológico que se adecúe a condiciones más reales en cuanto a su naturaleza nó uniforme, pues el cuerpo humano se estructura de diferentes clases de tejidos y cada uno con sus características propias, (permitividad, conductividad, etc.) con el fin de diseñar aplicadores de microondas de geometría cilíndrica. Para lograrlo podría utilizarse algún modelo Multicapas del tejido.
- Partiendo del análisis propuesto y con la ayuda del programa se estaría en capacidad de conseguir investigar el diseño de unidades aplicadoras de microondas de apertura circular multielementarias.
- Efectuar un estudio comparativo entre los resultados obtenidos en el caso de guías de sección circular, presentados, y los correspondientes para el de sección rectangular con el afán de determinar cual es más eficaz sobre cierto tipo de tejido irradiado.



BIBLIOTECA

APENDICES



APENDICE A

FORMULACION DE LA MATRIZ GENERALIZADA DE DISPERSION

Uno de los metodos que permiten calcular los coeficientes de reflexión y transmisión así como el campo electromagnetico que tienen lugar en las discontinuidades transversales en los dispositivos de microondas es el propuesto por Wexler (12) en 1967 denominado Análisis Modal.

Este desarrollo es aplicable al caso en que dos o más modos se propagan en las guías de onda, que por su naturaleza pueden clasificarse como una red de dos puertas.

En la unión de guías de diferentes características, se forma una interfaz que puede ser tratada como una discontinuidad transversal, y resuelta aplicando el Análisis Modal, teoría de la que se parte para determinar las expresiones de la Matriz de Dispersión Multimodal S para una red de dos puertas, ver fig. 1, dada por:

$$B = S * A$$

(1)

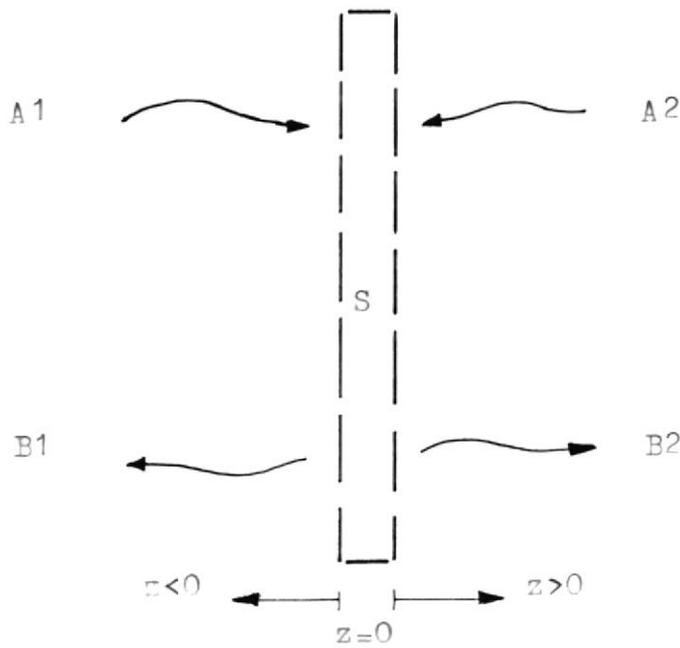
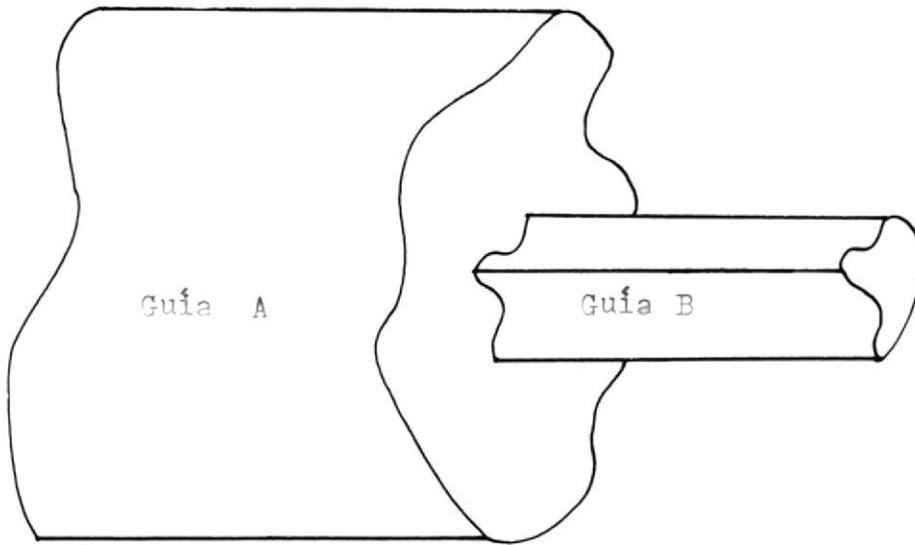


FIG. 1 DISCONTINUIDAD EN GUIAS DE ONDA Y LA MATRIZ DE DISPERSION MULTIMODAL

Siendo A la matriz de campos que inciden sobre la discontinuidad y B de los que se reflejan en ella.

$$\begin{pmatrix} B1 \\ B2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S11 & S12 \\ S21 & S22 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} A1 \\ A2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$B1 = S11*A1 + S12*A2 \quad (3)$$

$$B2 = S21*A1 + S22*A2 \quad (4)$$

Donde:

B1, B2 son submatrices de campos reflejados.

A1, A2 son submatrices de campos incidentes.

S11, S12, S21, S22 son submatrices de dispersión.

Las submatrices de Dispersión por definición son:

$$S11 = B1 * A1^{-1} \quad \text{cuando } A2=0 \quad (5)$$

$$S12 = B1 * A2^{-1} \quad \text{cuando } A1=0 \quad (6)$$

$$S21 = B2 * A1^{-1} \quad \text{cuando } A2=0 \quad (7)$$

$$S22 = B2 * A2^{-1} \quad \text{cuando } A1=0 \quad (8)$$

El análisis multimodal considera al campo electromagnético a cualquier lado de la discontinuidad como el resultado de la superposición de los campos incidentes y reflejados de un número infinito de modos a cada lado de la misma, ya sea que los modos incluidos se propaguen o no. Consultando (10) se tiene:

$$EA = \sum_{i=1}^M (A_i \exp(-j\beta_i z) + B_i \exp(j\beta_i z)) * e_i \quad (9)$$

$$HA = \sum_{i=1}^M (A_i \exp(-j\beta_i z) - B_i \exp(j\beta_i z)) * h_i \quad (10)$$

Para el campo eléctrico y magnético en la guía A, $z < 0$.

$$EB = \sum_{k=1}^N (A_k \exp(j\beta_k z) + B_k \exp(-j\beta_k z)) * e_k \quad (11)$$

$$HB = \sum_{k=1}^N (-A_k \exp(j\beta_k z) + B_k \exp(-j\beta_k z)) * h_k \quad (12)$$

Para el campo eléctrico y magnético en la guía B, $z > 0$.

En donde se ha asignado los valores M y N para el número de modos para la guía A y B respectivamente con el fin de acondicionar las ecuaciones a una situación práctica.

Observar la fig. 2.

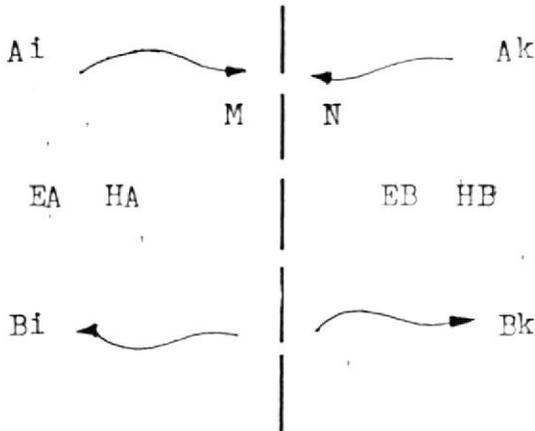
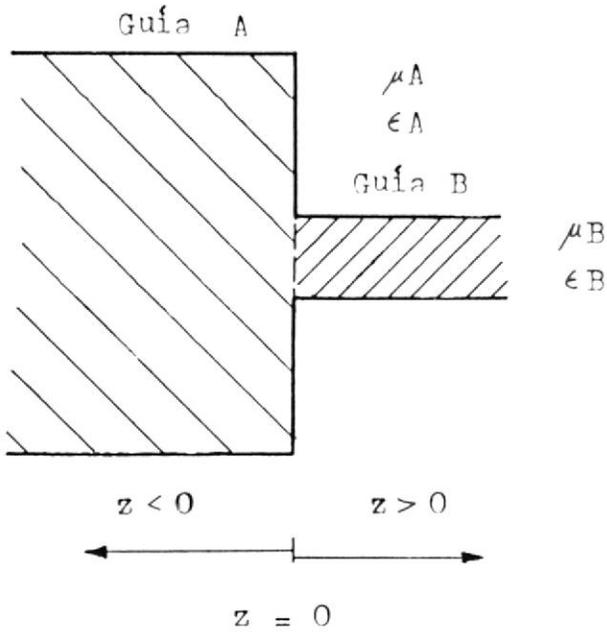


FIG. 2 DISCONTINUIDAD EN GUIAS DE ONDA.
SOLUCION MEDIANTE ANALISIS MODAL

Además β_k es la constante de propagación, e_k y h_k representan a las componentes vectoriales del campo electromagnético del k -ésimo número de modo N en la guía B . De igual manera los equivalentes para la guía A son β_i , e_i y h_i .

Por otra parte los campos tienen componentes en dirección transversal y en dirección axial, así:

$$e_i = e_{ti} + e_{zi} \quad (13)$$

$$h_i = h_{ti} + h_{zi} \quad (14)$$

Las ecuaciones de campo deben cumplir con las condiciones de salto para $z=0$, dadas por las fórmulas:

$$E_A = E_B \quad \text{cuando } z=0 \quad (15)$$

$$H_A = H_B \quad \text{cuando } z=0 \quad (16)$$

Las que nos conducen a:

$$\sum_{i=1}^M (A_i + B_i) * e_i = \sum_{k=1}^N (A_k + B_k) * e_k \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^M (A_i - B_i) * h_i = \sum_{k=1}^N (-A_k + B_k) * h_k \quad (18)$$

Note que en $z=0$ las componentes axiales del campo se anulan, es decir, $e_i=e_{ti}$ y $h_i=h_{ti}$, por lo que en adelante se usará la notación e_i , h_i para las componentes transversales del campo.

Multiplicando vectorialmente la ecu. 13 por h_j e integrando sobre la superficie S_0 se llega a:

$$\sum_{i=1}^M (A_i+B_i) \int_{S_0} \mathbf{e}_i \times \mathbf{h}_j \cdot d\mathbf{s} = \sum_{k=1}^N (A_k+B_k) \int_{S_0} \mathbf{e}_k \times \mathbf{h}_j \cdot d\mathbf{s}$$

Donde $d\mathbf{s}$ es un vector normal a la superficie S_0 . Tomando en cuenta dos hechos:

- por la condición de ortogonalidad de los modos en la guía A, se tiene:

$$\int_{S_A} \mathbf{e}_i \times \mathbf{h}_j \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad \text{para todo } j \neq i \quad (19)$$

- $S_0=S_B$, es el área común a las guías, S_A es la sección transversal completa y S_{CA} es la sección de conductor de la guía A, entonces:

$$S_A = S_0 + S_{CA} = S_B + S_{CA}$$

El valor de la integral en SCA es nula por cuanto en las paredes transversales ($z=0$) de la guía A no existen campos electromagnéticos, pues se asume que son de conductor perfecto, es decir:

$$\int_{SCA} \mathbf{e}_z \times \mathbf{h}_z \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (20)$$

Así se obtiene la siguiente expresión:

$$(A_1+B_1) \int_{SA} \mathbf{e}_z \times \mathbf{h}_z \cdot d\mathbf{s} = \sum_{k=1}^N (A_k+B_k) \int_{SB} \mathbf{e}_k \times \mathbf{h}_z \cdot d\mathbf{s}$$

Haciendo las siguientes definiciones:

$$P = \int_{SA} \mathbf{e}_z \times \mathbf{h}_z \cdot d\mathbf{s} \quad (21)$$

$$X = \int_{SB} \mathbf{e}_k \times \mathbf{h}_z \cdot d\mathbf{s} \quad (22)$$

Finalmente puede llegarse a las siguientes ecuaciones matriciales:

$$P \cdot (A_1 + B_1) = X^T \cdot (A_2 + B_2) \quad (23)$$

De igual manera multiplicando vectorialmente la ecu. 14 por e_j e integrando sobre la superficie S_0 se obtiene:

$$\sum_{i=1}^M (A_i - B_i) * \int_{S_0} e_j \times h_i . ds = \sum_{k=1}^M (B_k - A_k) * \int_{S_0} e_j \times h_k . ds$$

Y considerando que $S_0 = S_B$ junto a condición de ortogonalidad en la guía B, dada por la ecu. 24.

$$\int_{S_B} e_j \times h_k . ds = 0 \quad \text{para todo } j \neq k \quad (24)$$

No es difícil llegar a la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^M (A_i - B_i) * \int_{S_B} e_k \times h_i . ds = (B_k - A_k) * \int_{S_B} e_k \times h_k . ds$$

Utilizando la ecu. 16 y definiendo:

$$Q = \int_{S_B} e_k \times h_k . ds \quad (25)$$

La ecuación puede ser reescrita en forma matricial y resulta:

$$X * (A1 - B1) = Q * (-A2 + B2) \quad (26)$$

El paso siguiente es realizar la deducción de las fórmulas para las submatrices de Dispersión, utilizando el conjunto de ecuaciones conformado por la ecu. 5, 6, 7, 8, 23 y 26, cuyo desarrollo está a continuación.

Matriz S21

Anulando la matriz A2 en la ecu. 7 obtenemos:

$$B1 = P^{-1} * X^T * B2 - A1$$

Y reemplazándola en la ecu. 26, con A2=0, queda:

$$X * A1 - X * (P^{-1} * X^T * B2 - A1) = Q * B2$$

$$2 * X * A1 = (X * P^{-1} * X^T + Q) * B2$$

Utilizando la definición de la ecu. 7, resulta:

$$S21 = 2 * (X * P^{-1} * X^T + Q)^{-1} * X \quad (27)$$

Matriz S11

Utilizando la ecu. 23 con A2=0 se tiene:

$$P * (A1 + B1) = X^T * B2$$

donde B2 = S21 * A1, y reemplazando queda:

$$P * B1 = (X^T * S21 - P) * A1$$

Y usando de la definición de la ecu. 5, finalmente:

$$S11 = P^{-1} * X^T * S21 - I \quad (28)$$

Matriz S22

Anulando A1 en la ecu. 23, se tiene:

$$B1 = P^{-1} * X^T * (A2 + B2)$$

Y reemplazando esta última en la ecu. 26, entonces:

$$-X * (P^{-1} * X^T * (A2 + B2)) = Q * (-A2 + B2)$$

$$(Q + X * P^{-1} * X^T) * B2 = (Q - X * P^{-1} * X^T) * A2$$

Valiendose de la definición de la ecu. 8, finalmente se obtiene:

$$S22 = (X * P^{-1} * X^T + Q)^{-1} * (Q - X * P^{-1} * X^T) \quad (29)$$

Matriz S12

Anulando A1 en la ecu. 23, entonces queda:

$$P * B1 = X^T * (A2 + B2)$$

Donde $B2 = S22 * A2$, reemplazando y resolviendo:

$$B1 = P^{-1} * X^T * (I + S22) * A2$$

Para finalizar se aplica la definición de la ecu. 6 para hallar la expresión para S12 y es:

$$S12 = P^{-1} * X^T * (S22 + I) \quad (30)$$

Dimensión de las matrices:

$$A = (M+N) * 1$$

$$B = (M+N) * 1$$

$$S = (M+N) * (M+N)$$

$$A1 = M * 1$$

$$A2 = N * 1$$

$$B1 = M * 1$$

$$B2 = N * 1$$

$$S11 = M * M$$

$$S12 = M * N$$

$$S_{21} = N * M$$

$$S_{22} = N * N$$

$$P = M * M$$

$$Q = N * N$$

$$X = N * M$$

Antes de terminar, se deben plantear dos puntos que cuestionan la validez del análisis multimodal:

- Criterio de convergencia del método:

Rigiéndose acorde a lo que sugiere (8), para que los resultados del análisis modal sean válidos, la escogencia del número de modos debe guardar cierta relación con la sección transversal de las guías, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M/N = S_A/S_B$$

- El criterio de unificación de modos.

El número de modos a seleccionar debe contemplar la existencia de modos de propagación Transverso Electrico (TE) y Transverso Magnetico (TM).

A aquello debe adicionarse algún mecanismo tenga la capacidad seleccionar a cuál de los tantos modos utilizar en el cálculo multimodal, en (2) y (3) se da una solución a esta interrogante cuando la discontinuidad sucede en la unión de guías de apertura rectangular.

Así, se tiene que M representa el número unificado de modos en la guía A y de igual forma N en la guía B .

El desarrollo es válido para discontinuidades transversales en guías de cualquier geometría, como puede deducirse observando las expresiones para las matrices X , P y Q es precisamente que en su cálculo se emplearán las dimensiones físicas del caso, pero la formulación para la matriz de dispersión modal es totalmente independiente de la naturaleza dimensional de las guías de onda.

La lista de símbolos y variables utilizadas en el presente apéndice se encuentran en la siguiente página en forma resumida.

Simbología

Guía A	a	radio (interno)
Guía B	b	sección transversal
	EA	constante dieléctrica
	μ_A	permeabilidad magnética
	β_i	const. de propagación modal
EB	EA	vector campo eléctrico total
HB	HA	vector campo magnético total
AZ	A1	matriz mag. de campo incidente
AK	A1	esimo elem. de matriz incidente
BZ	B1	matriz mag. de campo reflejado
BK	B1	esimo elem. de matriz reflejada
	M	número de modos
	e_x	esimo vector campo elec. transve.
	h_x	esimo vector campo mag. transver.
A		matriz de amplitudes de campos incidentes
B		matriz de amplitudes de campos reflejados
S		matriz de Dispersión Multimodal
A1	A	matriz de campos incidentes desde guía A
AZ	B	matriz de campos incidentes desde guía B
B1	A	matriz de campos reflejados hacia guía A
BZ	B	matriz de campos reflejados hacia guía B
S11	A a pta. A	matriz de dispersión de la pta. A a pta. A
S12	B a pta. A	matriz de dispersión de la pta. B a pta. A
S21	A a pta. B	matriz de dispersión de la pta. A a pta. B
S22	B a pta. B	matriz de dispersión de la pta. B a pta. B

APENDICE B

FUNCIONES Y TABLAS DE BESSEL

El objetivo de esta parte es proveer información sobre la manera en que se determina el cálculo de la Función de Bessel de 1ª clase, y de su primera derivada.

Conforme se puede hallar en cualquier texto de Ecuaciones Diferenciales o de Matemáticas Avanzadas la Familia de Funciones de Primera clase de orden n puede ser evaluada a través de la denominada FORMA INTEGRAL DE BESSEL dada por la siguiente expresión:

$$J_n(x) = \frac{1}{\pi} * \int_0^{\pi} \cos(n*\phi - x*\text{sen}(\phi)) d\phi$$

La integral es calculada en el programa mediante la regla de 1/3 de Simpson, cuya fórmula se encuentra en cualquier texto de Análisis Numérico y no va a ser discutida aquí.

Para ejecutar el cálculo del valor de la primera derivada de la función de Bessel de primera clase de orden n fue utilizada la RELACION DE RECURRENCIA, que también puede ser tomada de cualquiera de los textos de Matemáticas mencionados, expresada por la siguiente ecuación:

$$J_n'(x) = (J_{n-1}(x) - J_{n+1}(x)) / 2$$

Para finalizar en las siguientes hojas se muestran las tablas de las raíces de la función de Bessel y de su derivada primera de orden $n=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ y para valores de $m=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ y 10 .

Además también son incluidas las tablas que contienen los valores de ambas funciones para $n=0, 1, 2, 3, 4$ y 5 contra el valor de x desde 0.0 hasta 45.0 .

 ***** RAICES DE LA PRIMERA DERIVADA DE BESSEL. MODO TE *****

M	N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3.83	1.84	3.05	4.20	5.31	6.41	7.50	8.57	9.64	10.71	
2	7.01	5.33	6.70	8.01	9.28	10.52	11.73	12.93	14.10	15.28	
3	10.17	8.53	9.96	11.34	12.68	13.98	15.26	16.52	17.77	19.00	
4	13.32	11.70	13.17	14.58	15.96	17.31	18.63	19.94	21.22	22.50	
5	16.45	14.86	16.34	17.78	19.19	20.57	21.93	23.26	24.58	25.89	
6	19.63	18.01	19.51	20.97	22.40	23.80	25.18	26.54	27.88	29.21	
7	22.74	21.16	22.67	24.14	25.59	27.01	28.40	29.79	31.15	32.50	
8	25.92	24.31	25.82	27.31	28.76	30.20	31.61	33.01	34.39	35.76	
9	29.09	27.45	28.97	30.47	31.96	33.38	34.81	36.22	37.62	39.00	
10	32.20	30.60	32.12	33.62	35.10	36.56	37.99	39.42	40.83	42.22	

 ***** RAICES DE LA FUNCION DE BESSEL. MODO TM *****

M	N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.40	3.83	5.13	6.38	7.58	8.76	9.93	11.07	12.22	13.34	
2	5.52	7.01	8.41	9.76	11.06	12.35	13.59	14.83	16.04	17.25	
2	8.65	10.17	11.62	13.01	14.37	15.68	17.00	18.27	19.55	20.79	
3	11.79	13.32	14.79	16.22	17.61	19.00	20.32	21.65	22.94	24.25	
4	14.92	16.45	17.95	19.39	20.82	22.20	23.58	24.91	26.26	27.56	
5	18.07	19.63	21.12	22.59	24.02	25.44	26.82	28.20	29.54	30.90	
6	21.21	22.74	24.26	25.73	27.19	28.60	30.02	31.40	32.79	34.13	
7	24.35	25.92	27.42	28.92	30.37	31.83	33.23	34.65	36.02	37.42	
8	27.48	29.02	30.56	32.04	33.53	34.96	36.41	37.81	39.23	40.60	
10	30.63	32.20	33.72	35.23	36.70	38.18	39.60	41.05	42.45	43.86	

VALORES DE LA FUNCION DE BESSEL							JN(X)	VS	X
X	N						4	5	
	0	1	2	3					
0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1.00	0.77	0.44	0.11	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	
2.00	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	0.03	0.01	0.01	
3.00	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.13	0.04	0.04	
4.00	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.28	0.13	0.13	
5.00	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.39	0.26	0.26	
6.00	0.15	-0.28	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.36	0.36	
7.00	0.30	0.00	-0.30	-0.17	0.16	0.16	0.35	0.35	
8.00	0.17	0.23	-0.11	-0.29	-0.11	-0.11	0.19	0.19	
9.00	-0.09	0.25	0.14	-0.18	-0.27	-0.27	-0.06	-0.06	
10.00	-0.25	0.04	0.25	0.06	-0.22	-0.22	-0.23	-0.23	
11.00	-0.17	-0.18	0.14	0.23	-0.02	-0.02	-0.24	-0.24	
12.00	0.05	-0.22	-0.08	0.20	0.18	0.18	-0.07	-0.07	
13.00	0.21	-0.07	-0.22	0.00	0.22	0.22	0.13	0.13	
14.00	0.17	0.13	-0.15	-0.18	0.08	0.08	0.22	0.22	
15.00	-0.01	0.21	0.04	-0.19	-0.12	-0.12	0.13	0.13	
16.00	-0.17	0.09	0.19	-0.04	-0.20	-0.20	-0.06	-0.06	
17.00	-0.17	-0.10	0.16	0.13	-0.11	-0.11	-0.19	-0.19	
18.00	-0.01	-0.19	-0.01	0.19	0.07	0.07	-0.16	-0.16	
19.00	0.15	-0.11	-0.16	0.07	0.18	0.18	0.00	0.00	
20.00	0.17	0.07	-0.16	-0.10	0.13	0.13	0.15	0.15	
21.00	0.04	0.17	-0.02	-0.17	-0.03	-0.03	0.16	0.16	
22.00	-0.12	0.12	0.13	-0.09	-0.16	-0.16	0.04	0.04	
23.00	-0.16	-0.04	0.16	0.07	-0.14	-0.14	-0.12	-0.12	
24.00	-0.06	-0.15	0.04	0.16	0.00	0.00	-0.16	-0.16	
25.00	0.10	-0.13	-0.11	0.11	0.13	0.13	-0.07	-0.07	
26.00	0.16	0.02	-0.15	-0.04	0.15	0.15	0.08	0.08	
27.00	0.07	0.14	-0.06	-0.15	0.03	0.03	0.16	0.16	
28.00	-0.07	0.13	0.08	-0.12	-0.11	-0.11	0.09	0.09	
29.00	-0.15	0.01	0.15	0.01	-0.15	-0.15	-0.05	-0.05	
30.00	-0.09	-0.12	0.08	0.13	-0.05	-0.05	-0.14	-0.14	
31.00	0.05	-0.13	-0.06	0.13	0.08	0.08	-0.10	-0.10	
32.00	0.14	-0.03	-0.14	0.01	0.13	0.13	0.04	0.04	
33.00	0.09	0.10	-0.10	-0.10	0.06	0.06	0.15	0.15	
34.00	-0.04	0.14	0.03	-0.11	-0.08	-0.08	0.15	0.15	
35.00	-0.14	0.05	0.11	-0.01	-0.17	-0.17	0.04	0.04	
36.00	-0.12	-0.07	0.08	0.12	-0.13	-0.13	-0.06	-0.06	
37.00	-0.02	-0.12	-0.06	0.17	-0.02	-0.02	-0.06	-0.06	
38.00	0.07	-0.04	-0.17	0.10	0.06	0.06	0.05	0.05	
39.00	0.05	0.09	-0.18	-0.02	0.02	0.02	0.15	0.15	
40.00	-0.08	0.15	-0.09	-0.07	-0.09	-0.09	0.16	0.16	
41.00	-0.21	0.09	0.01	-0.03	-0.17	-0.17	0.04	0.04	
42.00	-0.24	-0.03	0.01	0.07	-0.14	-0.14	-0.11	-0.11	
43.00	-0.15	-0.12	-0.08	0.09	-0.02	-0.02	-0.19	-0.19	
44.00	-0.03	-0.11	-0.17	0.01	0.10	0.10	-0.14	-0.14	
45.00	0.03	-0.01	-0.17	-0.14	0.11	0.11	-0.03	-0.03	

VALORES DE LA PRIMERA DERIVADA DE BESSEL VS X

X	0	1	2	3	4	5
0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	-0.44	0.33	0.21	0.06	0.01	0.00
2.00	-0.58	-0.06	0.22	0.16	0.06	0.02
3.00	-0.34	-0.37	0.01	0.18	0.13	0.06
4.00	0.07	-0.38	-0.25	0.04	0.15	0.12
5.00	0.33	-0.11	-0.35	-0.17	0.05	0.13
6.00	0.28	0.20	-0.20	-0.30	-0.12	0.06
7.00	0.00	0.30	0.08	-0.23	-0.26	-0.09
8.00	-0.23	0.14	0.26	0.00	-0.24	-0.22
9.00	-0.25	-0.12	0.21	0.21	-0.06	-0.23
10.00	-0.04	-0.25	-0.01	0.24	0.15	-0.10
11.00	0.18	-0.16	-0.20	0.08	0.23	0.09
12.00	0.22	0.07	-0.21	-0.13	0.13	0.21
13.00	0.07	0.21	-0.04	-0.22	-0.06	0.17
14.00	-0.13	0.16	0.16	-0.11	-0.20	0.00
15.00	-0.21	-0.03	0.20	0.08	-0.16	-0.16
16.00	-0.09	-0.18	0.07	0.19	0.01	-0.18
17.00	0.10	-0.16	-0.12	0.13	0.16	-0.06
18.00	0.19	0.00	-0.19	-0.04	0.17	0.11
19.00	0.11	0.15	-0.09	-0.17	0.03	0.18
20.00	-0.07	0.16	0.08	-0.15	-0.13	0.09
21.00	-0.17	0.03	0.17	0.00	-0.17	-0.07
22.00	-0.12	-0.13	0.11	0.14	-0.06	-0.16
23.00	0.04	-0.16	-0.05	0.15	0.09	-0.12
24.00	0.15	-0.05	-0.16	0.02	0.16	0.03
25.00	0.13	0.10	-0.12	-0.12	0.09	0.15
26.00	-0.02	0.16	-0.03	-0.15	-0.06	0.13
27.00	-0.14	0.07	0.14	-0.05	-0.15	0.00
28.00	-0.13	-0.08	0.12	0.10	-0.10	-0.12
29.00	-0.01	-0.15	0.00	0.15	0.03	-0.13
30.00	0.12	-0.08	-0.12	0.07	0.13	-0.03
31.00	0.13	0.06	-0.13	-0.07	0.11	0.11
32.00	0.03	0.14	-0.02	-0.14	-0.01	0.14
33.00	-0.10	0.10	0.10	-0.08	-0.13	0.06
34.00	-0.14	-0.03	0.13	0.06	-0.13	-0.07
35.00	-0.05	-0.13	0.03	0.14	-0.03	-0.12
36.00	0.07	-0.10	-0.10	0.10	0.09	-0.06
37.00	0.12	0.02	-0.14	-0.02	0.11	0.06
38.00	0.04	0.12	-0.07	-0.11	0.03	0.12
39.00	-0.09	0.11	0.05	-0.10	-0.09	0.07
40.00	-0.15	0.00	0.11	0.00	-0.12	-0.06
41.00	-0.09	-0.11	0.06	0.09	-0.03	-0.15
42.00	0.03	-0.13	-0.05	0.08	0.09	-0.13
43.00	0.12	-0.04	-0.11	-0.03	0.14	-0.01
44.00	0.11	0.07	-0.06	-0.13	0.07	0.10
45.00	0.00	0.10	0.06	-0.14	-0.06	0.11

APENDICE C

MANUAL DEL USUARIO

El programa naturalmente puede ser modificado o no conforme a la conveniencia del usuario, en cualquier caso debe esto hacerse con mucho cuidado. Por ejemplo se tiene que el número máximo de modos, actualmente 180, puede aumentarse si se incluyen más valores de las raíces de Bessel y su derivada primera, en las tablas respectivas contenidas en el archivo RA DA, no olvidando realizar el nuevo ordenamiento ascendente de ellas para tomar sus índices modales n , m , junto a su indicador de modo y ubicarlos en el archivo IN DA.

Es necesario cumplir la siguiente secuencia de pasos para realizar la ejecución del programa:

Para ingresar al sistema:

- 1) Encienda el terminal.
- 2) Solicite servicio presionando simultáneamente las teclas **ALT - SYSTEM**.
- 3) Escriba VM2 y presione la tecla **ENTER**.
- 4) Escriba el User Id: U30019 y luego escriba el Password: CAFT presione la tecla **ENTER**.

Una vez que se ha logrado ingresar, el usuario está en capacidad de modificar, compilar y ejecutar el programa implementado, para ayudar al estudio de un aplicador de microondas de apertura circular, que está escrito en el archivo DAE FORTRAN, la información de las tablas de las raíces de Bessel están el archivo RA DA y el archivo que contiene los índices modales está nombrado IN DA.

Se asume que el usuario se halla relacionado con el manejo del Editor y del Compilador Fortran del sistema solamente se mencionará que previa a la compilación del programa es necesario definir un espacio de memoria, de la siguiente manera:

- 1) escriba DEF STOR 3M y presione ENTER.
- 2) escriba I CMS y presione ENTER.
- 3) escriba DTRIPF NOPAN y presione ENTER.

Para efectuar la corrida del programa deben definirse los dispositivos de entrada y salida de datos, así:

- 1) FI 1 DISK RA DA y presione ENTER.
- 2) FI 2 DISK IN DA y presione ENTER.
- 3) FI 6 T y presione ENTER.
- 4) FI 7 DISK ____ ____ y presione ENTER.
- 5) START y presione ENTER.

BIBLIOGRAFIA

1. AUDET, J., BOLOMEY, J., PICHOT, C., N'GUYEN, D. ROBILLARD, M., CHIVE, M., y LEROY, Y.; Electrical Characteristics of Waveguide-Applicators for Medical Applications; Journal Microwave Power; 1980. Vol.15 pp. 177-186.
2. BECERRA, C., y REBOLLAR, J.; Electric Field Distributions of Waveguide Arrays for local Tumor Hyperthermia; Journal Microwave Power and Electromagnetic Energy; 1988. Vol.23 pp. 247-254.
3. BECERRA, C.; Diseno de Aplicadores de Multielementos para Hipertermia de Microondas; Inf. ETSIS/GEAM Universidad Politecnica de Madrid, Espana; 1988.
4. BOLOMEY, J., JOFRE, L., y PERONNET, G., On the Possible Use of Microwave-Active Imaging for Remote Thermal Sensing; IEEE Trans. Microw. Theory and Techn., 1983. Vol. MTT-31, N.9, pp. 777-781.
5. BOLOMEY, J., IZADNEGAHDAR, A., JOFRE, L., PICHOT, C. PERONNET, G., y SOLAIMANI, M.; Microwave Diffraction Tomography for Biomedical Applications; IEEE Trans. Microw. Theory and Techn., 1982. Vol. MTT-30, N.11 pp. 1998-2000.
6. CHEUNG, A., y ATRASH, T.; Microwave Hyperthermia for Cancer Therapy; IEE Proc., 1987. Vol.134, N.6 pp. 493-520.

7. COLLIN, R., Foundations for Microwave Engineering McGraw-Hill Physical and Quantum Electronics Series. Cap.3: 107-113, Cap.4: 170-179.
8. ENCINAR, J., y REBOLLAR, J.; Convergence of Numerical Solutions of Open-Ended Waveguide by Modal Analysis and Hybrid Modal-Spectral Techniques; IEEE Trans. Microw. Theory and Techn., 1986. Vol. MTT-34, N.7 pp. 809-819.
9. HAHN, G.; Hyperthermia for the Engineer: A Short Biological Primer; IEEE Trans. Biomed. Engin., 1984. Vol. BME-31, N.1, pp. 3-8.
10. REBOLLAR, J., y ENCINAR, J.; Design and Optimization of Multi-Stepped Waveguide Applicators for Medical Applications; Journal Microwave Power, 1984. Vol.19 pp. 259-267.
11. SCHWAN, H., y FOSTER, K.; RF-Field Interactions with Biological Systems: Electrical Properties and Biophysical Mechanisms; Proc. IEEE, 1980. Vol.86, N.1 pp. 104-112.
12. WEXLER, A.; Solution of Waveguide Discontinuities by Modal Analysis. IEEE Trans. Microw. Theory and Techn. Vol. MTT-15, N.9, pp.508-517.