# 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 Narváez

Guayaguil - 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 HERMANDS

ING. CARLOS BECERRA E.

210.0

Director de Tesis

Youg Flow Heis

INS. JORGE FLORES M.

Presidente del Tribunal

THE TOUEL VAPUR A.

Miembro del Tribunal

NB. JAIME SANTORO D.

tembro 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 Examenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

Carlos A. Sanchez Narvaez

#### RESUMEN

transversales en guias de onda a traves del Análisis todal, dirigido al diseño de aplicadores de microondas de apertura circular unielementarios, con la finalidad de soner la consideración su posterior utilización en Bionedicina en el tratamiento de tejidos cancerosos con terpondas.

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

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

diseño de varias alternativas de aplicadores fue levado a cabo sobre dos clases de tejidos biológicos:

### INDICE GENERAL

		PAG.
RESU	MEN	5
DOI	CE GENERAL	6
DNOI	CE DE FIGURAS	9
INTR	ODUCCION	12
DAP!	TULO I	
BEEV	E ESTUDIO DE LOS APLICADORES	14
1.1	Introducción	14
2.2	Tipos de Aplicadores	16
2.3	Definición de Parametros y Características	21
14	Utilizaciones	23
DP1	TULO 11	
MATR	IZ GENERALIZADA DE DISPERSION	25
	Introducción	25
2.2	Matriz de Dispersión: Definiciones	27
2.3	Ecuaciones Matriciales Generales	33
204	Ecuaciones Matriciales para Guiaondas de	
	Apertura Circular	35
De:	TULO 111	
INSE	TO DEL PROGRAMA	50
	Generalidades	50

Especificaciones de Entrada/Salida .	51	
III Diagramas de Flujo	54	1
L# Listado del Programa	64	1
COPETULO IV		
EMECUCION DEL PROGRAMA	7.	4
Ejemplo 1 del Diseño de un Aplicador	8	2
4.1.1 Datos de Entrada	8	2
4.1.2 Datos de Salida	8	4
Ejemplo 2 del Diseño de un Aplicador	9	6
4.2.1 Datos de Entrada		6
4.2.2 Datos de Salida	9	8
Anàlisis de Resultados		0
DESTULO V		
WEICACIONES		2
Introducción		12
13 Usos en Biomedicina: Hipertermia		14
5.2.1 Breve Estudio de los Tejidos		
Biológicos sometidos a Campos		
Electromagnéticos	13	21
Diras Aplicaciones	1	26
CLUSIONES Y RECOMENDACIONES	1	32
-BOICES		34
APENDICE A: FORMULACION DE LA MATRIZ		
LIZADA DE DISPERSION	1	35

4	APENDICE	В:	TABLAS	Y FUNCTONES	DE BESSEL	150
4	APENDICE	C:	MANUAL	DEL USUARIO		155
1000.11	BERAFIA	10000				157

#### 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 en 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 guias silindricas diferentes, una simula al tejido y la otra al eplicador.

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

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

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

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

El Capitulo 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 capitulo 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 energia 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.

capacitivos

tipos de externos inductivos

quias de onda

aplicadores radiantes

microstrip

según la

forma de

intersitiales

inducir calor internos

intracavitarios

conforme a su disposición geometrica y al número de guías, lo cual el lector facilmente imagina que hay quias de forma rectangular, circular, etc., y pueden estar compuestas por una o varias subguias, asi 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 dán una idea respecto a la forma física de los aplicadores de utilización externa.

Se específica que en esta tesis se estudiarán los aplicadores externos de microondas de forma cilindrica unielementarios.

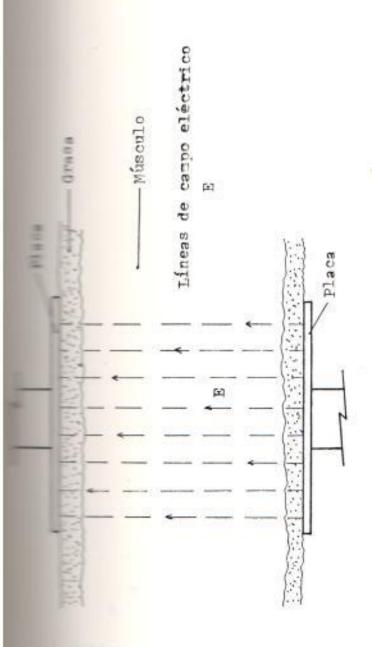
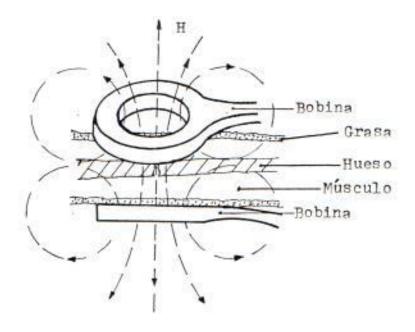


FIG. +1.1 APLICADORES EXTERNOS CAPACITIVOS

Cheung (6)



Lineas de campo magnético H

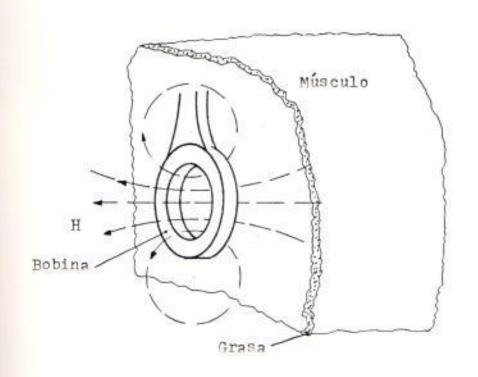
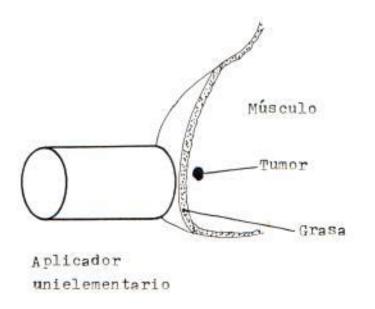


FIG. 1.2 APLICADORES EXTERNOS INDUCTIVOS



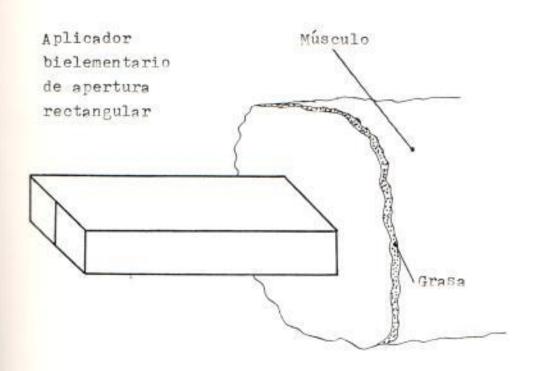


FIG. 1.3 APLICADORES EXTERNOS DE APERTURA RADIANTE

#### 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:

#### - Caracteristicas:

- Forma y dimensiones geometricas: el valor del diámetro, frecuencia de corte, etc.
- Relleno dielectrico: permitividad dielectrica y permeabilidad magnetica relativas.
- Material de fabricación del aplicador: define el valor de la atenuación.
- Número de modos considerados en el cálculo.

#### - Parametros:

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

#### Para el tejido:

#### - Características:

- Forma y dimensiones geometricas del tejido.
- Clase de tejido: permitividad dielectrica y permeabilidad magnetica relativas.
- Número de modos que intervienen en el cálculo.

#### - Parametros:

- La Matriz de Dispersión.
- Distribución volumetrica del campo electrico.
- Tasa de Absorción Especifica.
- 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 estimulo o campo electromagnetico incidente desde el aplicador corresponderá una respuesta en el tejido.

La tasa de absorción especifica 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, teniendose 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 diseno físico del aplicador, sino su análisis teórico con el auxilio del programa, por lo tanto no se hará enfasis en el tipo de material empleado para su construcción, lo que si se menciona es que con frecuencia existen consideraciones de peso y tamano 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 valdesde 1 a 150, así se senala en (6).

Lo principal para el diseno 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 Cirugia.

- a continuación se lista varias utilizaciones de los aplicadores en el campo de la Biomedicina:
- Tratamiento hipertermico del cancer.
- 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 Estema aplicador-tejido, pues el primordialmente influye el diseno de todo aplicador, esto puede efectuarse trabajando con la Matriz de Dispersión, a estudiarse en El presente capitulo.

la unión de guías de onda diferentes se forma una exerfaz que puede ser considerada como una simple red 2 puertas y resuelta aplicando una tecnica exacta propuesta por Wexler (12), conocida como Análisis Modal teoria sobre la que se fundamenta la Formulación de la fatriz de Dispersión Multimodal, vista en el Apendice A.

#### 2-1 Introducción

La teoria convencional sobre Microondas define a la matriz de dispersión (Parametros 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:



V

×

m

Matrix Voltsie incidente

S a Materia de Dispapetha (Managadal)

(I) co sil-coeffciente de reflexión de pts. 1 reflexion de pts. nta. 812=coeffciente de tranmsión de pta. tranmeten de s21=coeficiente de s22-coeffciente de

bi-voltaje reflejado en pts.

Cul

stavoltaje incidente en a2-voltaje incidente en b2-voltaje reflejado O. (I) × 911 912 821 822

11

55

RED DR 2 PITERTAS. ANALISTS MONOMOLL 2.1 MATRIC DE DISPERSION PARA UNA

- existen en las quias 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 enconvenientes, y seria una magnifica herramienta per brinde exactitud y rapidez en el cálculo, al ingeniero cuyo objetivo sea disenar aplicadores de escroondas de sección transversal circular.

#### 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 guias cilindricas de ejes concentricos, la de menor diámetro representa al aplicador, y la otra al tejido, (una guia imaginaria que contiene al material biológico).
- electromagnetico 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.

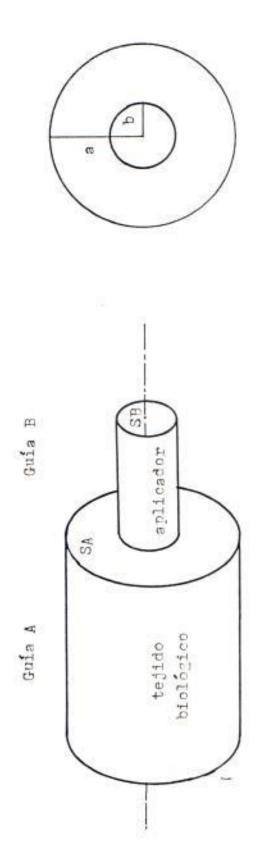
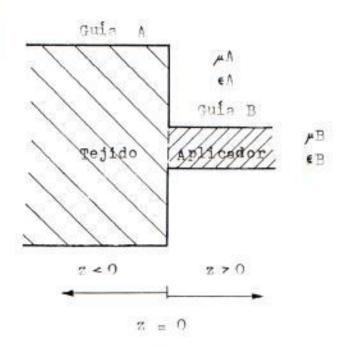


FIG. 2.2 MODELO DEL SISTEMA APLICADOR-TEJIDO. AMALISIS MODAL



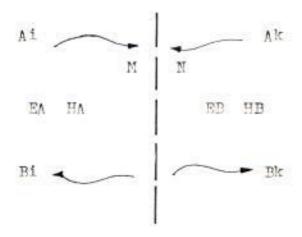


FIG. 2.3 INTERFAZ APLICADOR-TEJIDO. ENFOQUE MODAL

$$EA = \sum_{z=z}^{m} (A_z * exp(-j \beta_z * z) + B_z * exp(j \beta_z * z)) * e_z \quad (Z.1)$$

$$HA = \sum_{i=1}^{m} (A_i * e \times p(-j \beta_i * z) - B_i * e \times p(j \beta_i * z)) * h_i \qquad (2.2)$$

$$EB = \sum_{i=1}^{\infty} (A_i * exp(j \mathbf{\hat{y}}_i * z) + B_i * exp(-j \mathbf{\hat{y}}_i * z)) * e_i \qquad (2.3)$$

$$HB = \sum_{n=\pm}^{\infty} \left(-A_n * \exp(j\beta_n * z) + B_n * \exp(-j\beta_n * z)\right) * h_n (2.4)$$

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

$$EA = EB :_{x=0}$$
 (2.5a)

$$HA = HB :_{==0}$$
 (2.5b)

Para:	Guia A	Guia B
const.de propagación esimo modo	p .	Bu
vector campo electrico total	EA	EB
vector campo magnetico total	HA	HB
esimo elem. de matriz incidente	AL	A
esimo elem. de matriz reflejada	Bi	Be
número de modos	М	N

Además los vectores de campo electrico y magnetico  $e_{\star}$ ,  $h_{\star}$  son las componentes transversales de campo para el modo I en la guia A; equivalentemente  $e_{\rm k}$  y  $h_{\rm k}$  para el modo k en la guia B, puesto que en z=0 las componentes axiales de los campos se anulan.

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

#### Donde:

matriz de campos	incidentes desde	guía A	A1
matriz de campos	incidentes desde	guia B	AZ
matriz de campos	reflejados hacia	guía A	B1
matriz de campos	reflejados hacia	guía B	B2
matriz de dispers	sión de la pta. A	a pta. A	S11
matriz de dispers	ión de la pta. B	a pta. A	S12
matriz de dispers	ión de la pta. A	a pta. B	521
matriz de dispers	ión de la pta. B	a pta. B	522

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:

 $M/N = (a/b)^{2}$  (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 raices de la función de Bessel y su primera derivada.

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

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

$$BZ = S21*A1 + S2Z*A2$$
 (2.8b)

$$S21 = 2*(X*P^{-+} *X^{-} + G)^{-+} *X$$
 (2.9)

$$511 = P^{-1} *X^{T} *521 - I$$
 (2.10)

S22= 
$$(X*P^{-1}*X^{+} + Q)^{-1}*(Q - X*P^{-1}*X^{+})$$
 (2.11)

$$S12 = P^{-1} *X^{T} * (S22 + I)$$
 (2.12)

$$P = \int_{\mathbb{R}^{n}} e_{\pm} \times h_{\pm} \cdot ds \qquad (2.13)$$

$$0 = \int_{SB} e_{h} \times h_{k} \cdot ds \qquad (2.14)$$

$$X = \int_{SE} e_h \times h_K \cdot ds \qquad (2.15)$$

Las dimensiones de las matrices son:

#### Ecuaciones para Aplicadores de Apertura Circular

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

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 subindices nm, con i, entonces resultan:

#### - Para el modo TE

$$-j*n*p_{1}*Zh_{1}$$
 $=r_{1}=\frac{-j*n*p_{1}*Zh_{1}}{r*Kc_{1}=}*J_{n}(p_{1}**r/a)*cos(n*\phi)$ 

$$hr_{\perp} = -e\phi_{\perp}/Zh_{\perp}$$

$$hs_1 = er_1/2h_1$$

$$hz_{\pm} = J_n(p_{\pm} * r/a) * sen(n*\phi)$$

magnitud del campo angular es unitaria y las expresiones guedan:

$$j*p_{\pm}*p_{\pm}^**Zh_{\pm}/(a*Kc_{\pm}^2) = (e\phi_{\pm}) = 1$$
 (2.16)

$$e\phi_{\perp} = J_{n} \cdot (p_{\perp} \cdot *r/a) *sen(n*\phi)$$
 (2.18)

$$ez_{\perp} = \emptyset \tag{2.19}$$

$$hr_1 = -J_n'(p_1'*r/a)*sen(n*p)/2h_1$$
 (2.20)

Donde Zhi es la impedancia de onda para el modo TE, pi' la raíz de la primera derivada de la función de Bessel Jn' y pi es la constante de propagación, del iesimo número M de modo en la guía A.

#### - Para el modo TM

$$e\phi_{\pm} = \frac{-j*n*\varphi_{\pm}}{-----} * J_n(p_{\pm}*r/a) * cos(n*\phi)$$

$$r*Kc_{\pm} \approx$$

$$ez_{\perp} = J_n(p_{\perp}*r/a)*sen(n*d)$$

$$hr_4 = -e\phi_1/2e_4$$

$$h\phi_{\pm} = er_{\pm}/2e_{\pm}$$

$$hz_k = \emptyset$$

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

$$-j*p_**p_*/(a*Kc_*^2) = |er_*| = 1$$
 (2.25)

$$er_{\pm} = J_{n} \cdot (p_{\pm} * r/a) * sen(n*\phi) \qquad (2.26)$$

$$PZ_{\perp} = \frac{j*p_{\perp}}{--} *J_{n}(p_{\perp}*r/a)*sen(n*\phi)$$
 (2.28)

$$hr_1 = \frac{-a*n}{r*p_1*Ze_1} * J_n(p_1*r/a)*cos(n*ø)$$
 (2.29)

$$h\phi_{\perp} = J_{n'}(p_{\perp}*r/a)*sen(n*\phi)/Ze_{\perp}$$
 (2.30)

$$hz_{\pm} = 0$$
 (2.31)

Donde Zei es la impedancia de onda para el modo

TM, pi la raiz de la función de Bessel Jn y pi es

la constante de propagación, pertenecientes a un

número i de modos unificados M en la guia A.

Por otra parte las componentes vectoriales de campo son:

$$er_{\pm} = er_{\pm} r$$
 (2.23a)

$$e\phi_{\pm} = e\phi_{\pm} \phi$$
 (2.23b)

$$ez_{\pm} = ez_{\pm} z$$
 (2.23c)

$$br_{\pm} = hr_{\pm} r \tag{2.24a}$$

$$h\phi_{\pm} = h\phi_{\pm} \phi \qquad (2.24b)$$

$$hz_{\pm} = hz_{\pm} z \tag{2.24c}$$

\* las componentes transversales (en z=0) del campo

$$e_x = er_4 + e\phi_3$$
 (2.34)

$$= hr_4 + h\phi_4 \tag{2.35}$$

#### P. sinte 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.

$$P_{\perp} = \int er_{\perp} *h\phi_{\perp} *r*dr*d\phi + \int e\phi_{\perp} *hr_{\perp} *r*dr*d\phi$$
 (2.36)

Donde Pi es una matriz Mxl que contiene los elementos de la diagonal principal de la matriz P de dimensión MxM.

## - 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.

$$P_{4} = \frac{1}{Zh_{4}} \left[ \frac{a*n}{p_{4}} \right]^{2} *Ki* \int_{\mathbb{C}} [J_{m}(p_{4})*n/a)]^{2} dn/r$$

$$- K2* \int_{\mathbb{C}} [J_{m}(p_{4})*n/a)]^{2} r*dr \left[ (2.37) \right]^{2}$$

Y los valores de las constantes K1 y K2 son:

$$K1 = \int [\cos(n*\phi)]^{\pm} d\phi = \sin (2.37a)$$

$$\pi \quad n \neq \emptyset$$

$$K2 = \int [sen(n*\phi)]^{2} d\phi$$
  $g = 0$   $n=0$   $(2.37b)$ 

#### - Mode 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 megundo sumando de la misma 2.36 se obtiene a la ecu. 2.38.

$$P_{\perp} = \frac{-1}{Ze_{\perp}} \left[ \left( \frac{a*n}{--} \right)^{2} *K1* \int_{e_{\perp}} [J_{n}(p_{\perp}*r/a)]^{2} dr/r - K2* \int_{e_{\perp}} [J_{n}'(p_{\perp}*r/a)]^{2} r*dr \right] (2.38)$$

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

### Deducción de la Matriz O

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

			guia A	cambiar	guia B
- e1	indice	modal	i	con	k
- e1	radio		a	con	b
- el	factor	moda1	n	con	(F)

#### - Modo TE:

$$Q_{+} = \frac{1}{2h_{+}} \left[ \left( \frac{b*s}{p_{+}} \right)^{2} *K1* \int_{e}^{b} [J_{e}(p_{+} *r/b)]^{2} dr/r - K2* \int_{e}^{b} [J_{e} (p_{+} *r/b)]^{2} r*dr \right] (2.39)$$

Donde Gk es una matriz Nx1 que contiene los elementos de la diagonal principal de G (NxN).

- Modo TM:

$$Q_{L} = \frac{-1}{Ze_{L}} \left[ \frac{b*s}{p_{L}} \right]^{2} *K1* \int_{e}^{E} [J_{2}(p_{L}*r/b)]^{2} dr/r$$

$$- K2* \int [J_{2}(p_{L}*r/b)]^{2} r*dr$$
 (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.

$$X = \int_{SB} er_{i} *hp_{i} *r*dr*dp + \int_{SB} ep_{i} *hr_{i} *r*dr*dp \qquad (2.41)$$

Puesto que el indice i para la guia A representa la pareja de subindices nm, y k para la guia B los 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 ademas 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.

$$X = \frac{-1}{Ze_{\perp}} \left[ \frac{b*s}{p_{k}} *K5* \int_{J_{m}} J_{m}(p_{k} *r/b) *J_{m}'(p_{\perp}*r/a) dr \right]$$

$$+ \frac{a*n}{p_{\perp}} *K6* \int_{J_{m}} J_{m}'(p_{k} *r/b) *J_{m}(p_{\perp}*r/a) dr \right] (2.43)$$

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

$$K5 = \int_{\text{sen}(n*\phi)*cos(s*\phi)}^{\pm 1} d\phi = \int_{\text{sen}(n*\phi)*cos(s*\phi)}^{\pm 1/4n} n=s\neq 0$$
 (2.43a)

$$K\delta = \int_{\text{sen}(s*\phi)*\cos(n*\phi)}^{\infty \pi} d\phi =$$

Pera K3, K4 están dadas por las ecu.2.42a y 2.42b, respectivamente.

pra el jesimo modo en la guia A son anotadas a continuación:

- Mode TE:

 $120\pi*(\mu Ar/\epsilon Ar)^{1/2}$ =----(2.46a)  $(1 - [150*p_1'/(\pi*a*fo*(\mu Ar*\epsilon Ar)^{1/2})]^2)^{1/2}$ 

- Mode TM:

I==120π\*(μAr/«Ar)\*/\* \*
[1 - [150\*p<sub>4</sub>/(π\*a\*fo\*(μAr\*εAr)\*/\*)]\*)\*/\*(2.46b)

EAr y µAr, 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, AZ tiene sólo una componente diferente de cero y es la magnitud unitaria del campo para el modo fundamental TEIL, con lo cual se asegura que existe sólo dicho modo propagándose en el aplicador, cuya frecuencia de corte es:

$$f_{CTEII} = \frac{150*(pk'=1.84)}{\pi*b*(pBr*eBr)^{1/2}}$$
(2.47)

La matriz de campo incidente desde el tejido hacia la unión. Al 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:

$$EA = \sum_{i=1}^{M} B_{i} * exp(j\beta_{i} * z)) * e_{i}$$
  $z < \emptyset$ 

Recordando que el vector el 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:

EAr = 
$$\sum_{i=1}^{M} B_i * e \times p(j p_i * z)) * e r_i r$$
  $z < \emptyset$  (2.48a)

$$\mathsf{EA}\phi = \sum_{z=1}^{M} \mathsf{B}_{z} * \mathsf{exp}(\mathsf{j} \phi_{z} * z)) * \mathsf{e}\phi_{z} \; \phi \qquad z < 0 \qquad (2.48b)$$

$$EAz = \sum_{i=1}^{M} B_i * exp(j\beta_i * z)) * ez_i z \qquad z < \emptyset \qquad (2.48c)$$

Note que eri, emi y ezi 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 iesimo

modo se determina mediante:

$$\beta_{\perp} = (Ko^{2} - Kc_{\perp}^{2})^{1/2}$$
 (2.49a)

$$Ko = 2\pi * fo* (\muo* eo)^{\pm/2} = \pi * fo/150$$
 (2,49b)

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

 $|EA| = (|EAr|^2 + |EAg|^2 + |EAz|^2)^{1/2}$  (2.50)

#### CAPITULO III

#### DISEÃO DEL PROGRAMA

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

#### 3.1 Generalidades

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

- El anàlisis 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

programa en realidad es voluminoso, como lo demuestra el paquete de ecuaciones desarrolladas en el capitulo anterior, por lo tanto no es posible detallar la aparición de todos ellos, sinembargo 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.

## stos de Entrada

Dos clases de datos solicita el programa:

- Tablas de datos que obedecen al ordenamiento ascendente de los valores de las raices 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 raices, en total 180.
  - el archivo IN DA contiene tres columnas de datos:
    - la primera el valor de n= 1, 2, ...., 9.
- la segunda el valor de m= 1, 2, ..., 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.).
    - diametro de la guia.(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 electrico total, en el interior del tejido biológico, (magnitud y fase, en V/m.).
  - para cada plano radial, (en mm.).
    - varios Angulos, (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 apendice E).

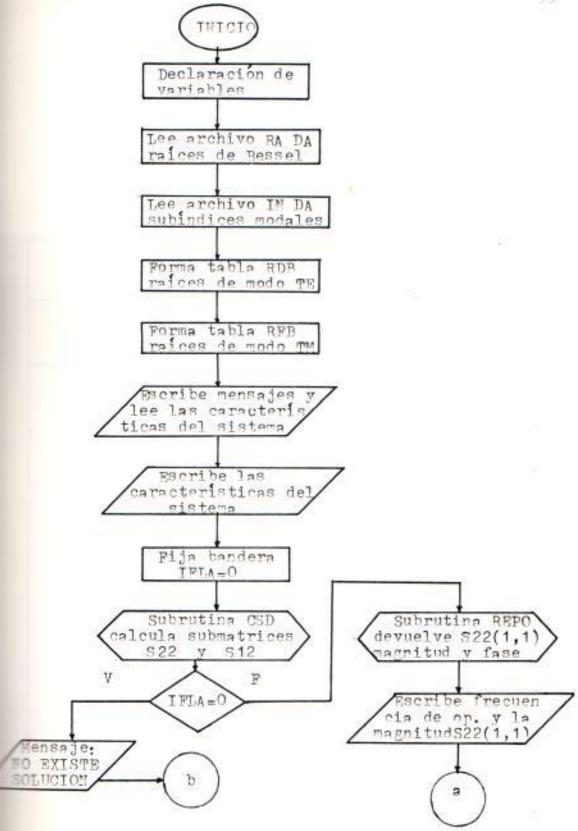
## 3.3 Diagramas de Flujo

El programa consta de las 11 partes siguientes:

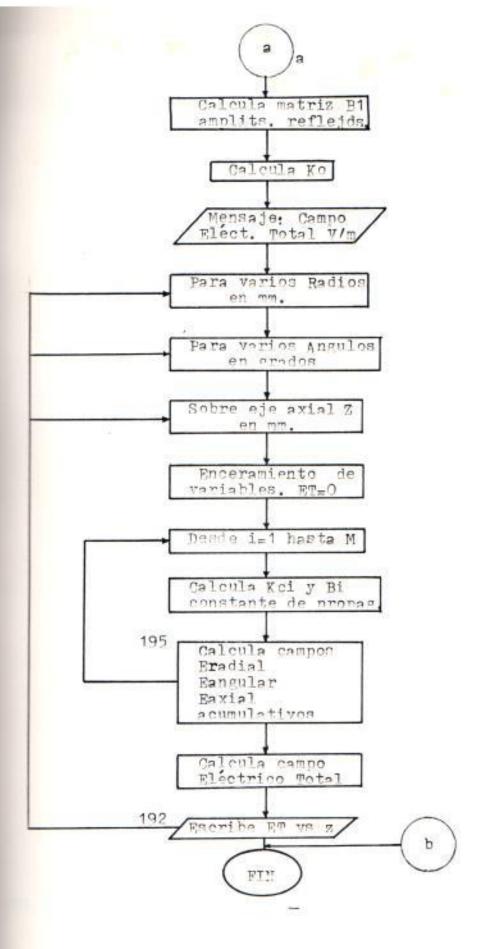
## - Programa Principal.

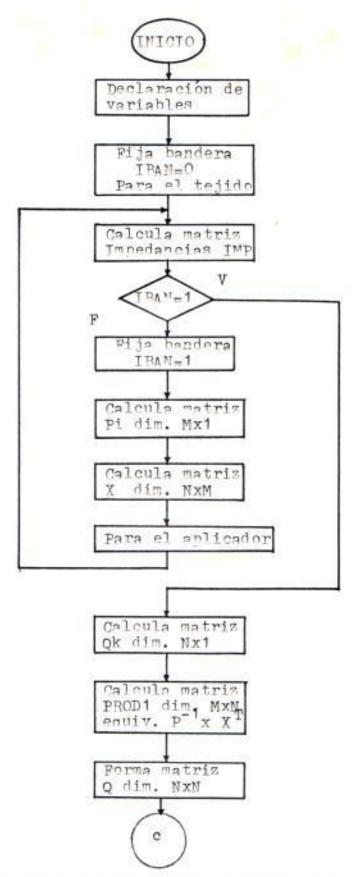
Realiza el cálculo de la magnitud del campo electrico total en el tejido, las variables de mayor importancia están listadas a continuación:

- 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 guia B. aplicador.
- RFB, RDB tabla de raices de la función de Bessel y su derivada, respectivamente.
- IN. IM tabla de subindice 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.
- CETO magnitud del campo electrico total.

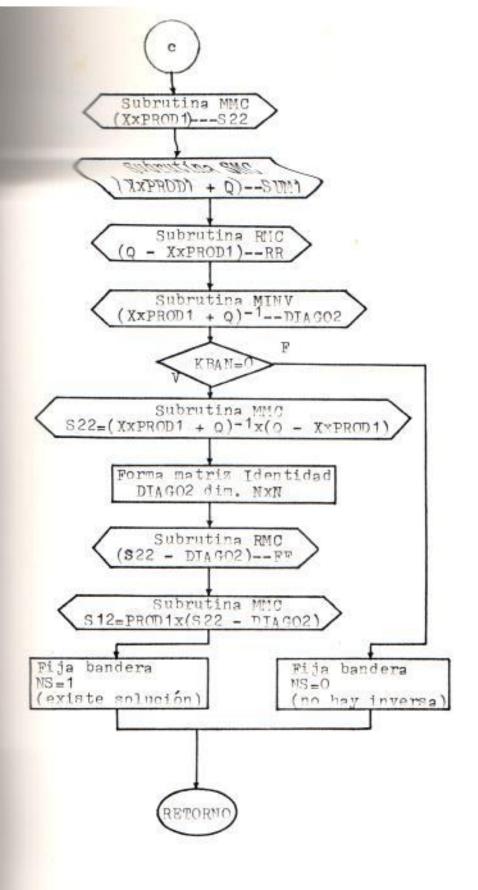


MG. 3.1 Diagrama de Flujo del programa principal.





MG. 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 guia A, tejido.
- UGB permeabilidad relativa en el aplicador.
- EGB permitividad relativa en el aplicador.
- RGB radio de la guia B, aplicador.
- FDP 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 Pi dimensión Mx1.
- ELQJ matriz Ok de dimension Nx1.
- ELXJI matriz X dimension NxM.
- PROD1 matriz que evita utilización de matrices de dimensiones MxM. lográndose así ahorrar memoria. Equivale a la siguiente operación matricial: P-I \* XT de dimensiones MxN.
- FF matriz O dimension NxN.

#### - 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 Ø 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, dimension 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, dimension 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 FDINBE.

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

$$Jn(x) = \frac{1}{\pi} * \int_{-\pi}^{\pi} cos(n*\phi - x*sen(\phi)) d\phi$$

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

- Ni 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:

$$Jn'(x) = (Jn_{-1}(x) - Jn_{+1}(x))/2$$

Por lo cual, a su vez se invoca a la función FDINBE 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 D. Tambien se aplica la regla de 1/3 de Simpson para evaluar la integral; los argumentos que necesita son:

- R valor del radio la guia.
- NP valor del indice modal n.
- PNM valor de la raiz 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 pera determinar el valor de las ecuaciones integrales correspondientes.

## - Función XXJI.

Efectua 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 guia A.
- RB radio de la guia B.
- NN valor del indice modal n para la guia A.
- NP valor del indice modal s para la guie B.
- PNM valor de la raíz de Bessel o su derívada para la guía A.
- PPO valor de la raiz de Bessel o de su derivada para la guía B.
- Ni 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 MICROGNDAS DE
     APERTURA CIRCULAR PARA IRRADIACION BIOMEDICA
C#### AUTOR
                  CARLOS
                         SANCHEZ
                                 NARVAEZ
E**** DIRECTOR
                  CARLOS
                        BECERRA
                                ESCUDERO
E**** LUGAR/FECHA BUAYAGUIL DCTUBRE 1 DE 1989
Essas PROGRAMA PRINCIPAL ***************************
    PARAMETER (NMA=180,NMB=5)
    REAL*8 FOINBE, XJNDER
          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)
E**** LECTURA DE LAS TABLAS DE RAICES DE BESSEL PARA ******
DI*** LLEVAR A CABO LA UNIFICACION DE LOS MODOS **********
    READ(1,15)(RAIZ(I), I=1,180)
    FORMAT(9F6.2)
    DO 11 I=1.180
    READ(2,*) IN(I),IM(I),NBAN(I)
    CONTINUE
E*** FORMACION DE LAS TABLAS DE RAICES DE BESSEL ********
    INT=Ø
E*** RAICES DERIVADA DE BESEL. MODOS TE *************
    DO 6 I=1.10
    DO 6 J=1.9
INT=INT+1
    RDB(I,J)=RAIZ(INT)
*** RAICES FUNCION DE BESEL. MODOS TM **************
    DD 7 I=1.10
    DO 7 J=1,9
    INT=INT+1
    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)
    FORMAT(1X, DIGITE FREC.DE OPERACION (GHZ.): XX.XX ')
    READ(6.*) FRE
DIEX CARACTERISTICAS DE LA GUIA B (APLICADOR) **********
    WRITE(6.5)
    FORMAT(1X, CARACTERISTICAS DEL APLICADOR )
    WRITE(6,3)
```

```
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)
     FORMAT(1X, 'CARACTERISTICAS DEL TEJIDO ')
    RA=6. *RB
     UA=UR
     WRITE(6,4)
     FORMAT(1X, DIGITE PERMITIVIDAD DIE. RELATI.: (XX.XX) )
     READ(4,*) EA
D**** VALORES QUE EL USUARIO PUEDE CAMBIAR ** FIN BLOQUE **
E**** 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, DISENO APLICADOR DE MICROONDAS CILINDRICO)
     WRITE(6,42)
     WRITE(7,42)
     FORMAT(31%, APLICADOR
                                TEJIDO ')
     WRITE(6,43) REAL(EB), AIMAG(EB), REAL(EA), AIMAG(EA)
     WRITE(7,43) REAL(EB), AIMAG(EB), REAL(EA), AIMAG(EA)
     FORMAT(5X, PERMITIVIDAD DIELECTRICA 1,1X,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)
     FORMAT(5X, PERMEABILIDAD MAGNETICA 1,1X,2F6.1,3X,2F6.1)
     WRITE(6,45) RB*2.,RA*2.
     WRITE(7,45) RB*2, RA*2.
     FORMAT(5X, DIAMETRO GUIA (MM.) ,8X,F5.1,10X,F5.1)
     WRITE(6,46) NMB, NMA
     WRITE(7,46) NMB,NMA
    FORMAT(5X, NUMERO DE MODOS
                                   *,8X,I3,12X,I3)
     WRITE(6,8) FRE
     WRITE(7,8) FRE
     FORMAT(5X, FREC. DE OPERACION (GHZ.) ,F5.2/)
18:
**** CALCULAR LAS SUBMATRICES DISPERSION ST12 Y ST22 ******
412
    IFLA=Ø
     CALL CSD(UA, EA, RA, UB, EB, RB, FRE, IFLA)
     IF(IFLA.EG.0) GO TO 222
**** DATOS SALIDA: COEF. REFLEXION Y TRANSMISION ********
     COEI=ST22(1,1)
     COE2=ST12(1,1)
     CALL REPO(COE1, COREM, COREA)
     CALL REPO(CDE2, COTRM, COTRA)
    WRITE(6,49)
     WRITE(7,49)
490
     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
39 FORMAT(5X,4E10.2)
*** CALCULO DE LA MATRIZ AMPLITUDES REFLEJADAS EN BUIA A *
120 XK1=1.0
     DO 101 I=1,NMA
181
    BM(I)=ST12(I,1)*XK1
E99 COKO=PI*FRE/150.
```

```
DEL CAMPO ELECTRICO TOTAL *****************
  E(T.388)
  CAMPO ELECTRICO TOTAL VS EJE Z ')
    PARA R=0.0 NO DEBE HACERSE **************
 F1=0.1,24.2,6.0
 Eso,335) R1
 335) R1
 PLANU RADIAL
                       (MM) ',F5.1)
 FA1=0.0,0.8*PI,PI/4.
 6.336) FA1*180./PI
 336) FA1*180./PI
 10x. CURVA ANGULAR (GRADOS) ',F5,1)
 E 6.334)
 E (7,334)
 20x, MAG. ET (V/M) ',5x, EJE Z (MM)'/)
 21=2.5,33.1,5.0
 0-2-0
 (0.0,0.0)
 == (0.0,0.0)
 X(0.0,0.0)
 === I=1,NMA
 DEEN(I)
 MINIMIN(I)
 THEN
 FERDB(IMT, INT) *R1/RA
 BEST COURT (UR*(COKO**2-(RTEMP/R1)**2))
  - Sent the street of the backet to be the second delivers
    ポエンドインスタインフィイスエオ
    COE3=COE3+XJNDER(INT,RTEMP)*SIN(INT*FA1)*BM(I)
    J*CEXP(COP*Z1)
   ELSE
    RTEMP=RFB(IMT, INT) *R1/RA
    CDE1=CDE1-RTEMP*FDINBE(INT,RTEMP)*SIN(INT*FA1)*BM(I)
    1*CEXP(COP*Z1)/(R1*COP)
    CDE2=CDE2+XJNDER(INT,RTEMP)*S1N(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(CDE1)**2+CABS(CDE2)**2+CABS(CDE3)**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
E**** SUBRUTINA PARA REALIZAR EL CALCULO LAS *************
D**** SUBMATRICES 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)
               FF(NMB,NMB),RR(NMB,NMB),DIAGO2(NMB,NMB)
     COMPLEX
               SUM1 (NMB, NMB), PROD1 (NMA, NMB)
     COMPLEX
     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)
D#### DEFINICION DE VALORES CONSTANTES ########################
     UR=CMPLX(1..0.)
     UI=CMPLX(0.,1.)
     PI=4.*ATAN(1.0)
E**** DEFINICION DE BANDERAS *************************
     KBAN=Ø
     NS=Ø
     IBAN=0
E**** CALCULO DE LAS IMPEDANCIAS IMP(NMA) **************
     CZM=120.*PI*CSGRT(UGA/EGA)
     CFM=PI*RGA*FOP*CSGRT(UGA*EGA)/150.
     NURE=NMA
    DO 100 K=1.NURE
     INT=IN(K)
     IMT=IM(K)
    IF(NBAN(K).EG.1) GO TO 110
     IMP(K)=CZM/CSGRT(1-(RDB(IMT,INT)/CFM)**2)
     GO TO 100
110 IMP(K)=CZM*CSORT(1-(RFB(IMT,INT)/CFM)**2)
100 CONTINUE
     IF(IBAN.EG.1) GO TO 410
 IBAN=1
**** CALCULD 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, Ø)/RTEMP**2-
    1VAC2*XINTE(RGA, INT, RTEMP, 1)
     IF(NBAN(I).EG.1) ELPI(I) =-ELPI(I)
200 CONTINUE
D#*** 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
     VAC1=PI*RGA*RGB*INT**2/IMP(IC)
     VAC2=PI/IMP(IC)
```

400

330

```
IF(NBAN(JF).EQ.0) THEN
     RTEMP=RDB(IMT.INT)
     RTEMPI=RDB(IMTB, INT)
     ELSE
     RTEMP=RFB(IMT, INT)
     RTEMP1=RFB(IMTB,INT)
     ENDIF
     ELXJI(JF, IC)=VAC1*XXJI(RGA, RGB, INT, INT, RTEMP, RTEMP, Ø)/
    1(RTEMP*RTEMP1)-VAC2*XXJI(RGA,RGB,INT,INT,RTEMP,RTEMP,-2)
     IF(NBAN(JF).EG.1) ELXJI(JF.IC)=-ELXJI(JF.IC)
     GO TO 300
IF (INT.NE.INTB) GO TO 300
320 VAC1=-0.25*RGB/IMP(IC)
     VAC2=-0.25*RGA/IMP(IC)
     IF (NBAN(JF), EQ. Ø) THEN
     RTEMP=RDB(IMTB, INTB)
     RTEMP1=RFB(IMT, INT)
     ELSE
     RTEMP=RFB(IMTB, INTB)
     RTEMP1=RDB(IMT, INT)
     ELXJI(JF.IC)=VACI*XXJI(RGA, RGB, INT, INTB, RTEMP1, RTEMP, 2)/
    1RTEMP+VAC2*XXJI(RGA,RGB,INT,INTB,RTEMP1,RTEMP,12)/RTEMP1
388
    CONTINUE
DIES FIN DEL CALCULG DE ELEMENTOS XJI *****************
DESS CALCULO DE LAS IMPEDANCIAS IMP(NMB) ***************
     CZM=120.*PI*CSORT(UGB/EGB)
     CFM=FI*RGB*FOP*CSGRT(UGB*EGB)/150.
     NURE=NMB
     GO TO 400
410
     CONTINUE
DO 500 J=1,NMB
     INT=IN(J)
     IMT=IM(J)
    ELGJ(J) = EMPLX(.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, Ø)/RTEMP**2-
    1VAC2*XINTE(RGB.INT.RTEMP.3)
     IF(NBAN(J).E0.1) ELOJ(J)=-ELOJ(J)
     CONTINUE
== ** CALCULO DE LA MATRIZ PRODI *********************
     DO 600 I=1,NMA
     DO 600 J=1,NMB
     PROD1(I,J) = CMPLX(.0,.0)
     IF(ELPI(I).EQ.0) 60 TO 610
B05
    PRGD1(I,J)=ELXJI(J,I)/ELPI(I)
     60 TO 600
010
    IF(ELXJI(J.I).E0.0) 80 TO 620
615
    WRITE(6,611)
     FORMAT(5x, DIVISION POR CERO EN PROD1')
     KBAN=1
     GO TO 600
```

500

```
628 WRITE(6,612)
E12 FORMAT(5X, 'INDETERMINACION NULA EN PROD1')
    KBAN=1
E00
    CONTINUE
     IF(KBAN.EQ.1) GO TO 991
FORMACION DE LA MATRIZ D **********************
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)
CONTINUE
____ CALCULO DE LAS SUBMATRICES S22 Y B12 **************
    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, DIAGOZ, KBAN)
    IF(KBAN.EQ.Ø) GOTO 990
    CALL MMC(DIAGO2, RR, NMB, NMB, NMB, ST22)
FORMACION DE LA MATRIZ IDENTIDAD ***************
    DO 102 I=1,NMB
    DO 102 J=1,NMB
    DIAGO2(1.J)=CMPLX(0.,0.)
    IF(I.EG.J) DIAGOZ(I,J)=CMPLX(1.,Ø.)
    CONTINUE
    CALL SMC(ST22, DIAGO2, NMB, NMB, FF)
    CALL MMC(PROD1, FF, NMA, NMB, NMB, ST12)
    NS=1
    RETURN
   WRITE(6,229)
    WRITE(7,229)
   FORMAT(5X, EXISTE ERROR EN LA INVERSION')
    RETURN
    END
*** SUBRUTINA PARA CALCULAR LA INVERSA DE UNA MATRIZ ****
COMPLEJA POR EL METODO DE GAUSS-JORDAN MODIFICADO ****
A=MATRIZ CUYA INVERSA SE DESEA DBTENER ***********
**** N=ORDEN DE LA MATRIZ A *********************
IDET=VALOR DEL DETERMINANTE DE MATRIZ A ***********
C=MATRIZ INVERSA RESULTANTE *******************
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)
ERRD=0.00001
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.)
 CONTINUE
INICIALIZAR COLUMNA Y FILA PIVOTE ***************
    DD 3 I=1,N
    MVR(I)=0
   MVE(I)=0
BUSCAR EL ELEMENTO MAYOR PARA SER USARLO DE PIVOTE ***
```

DO 15 K=1.N

```
RAMAX=CMPLX(.0,.0)
    LC=Ø
    LR=Ø
    DO 5 I=1,N
    IF(MVR(I).EG.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
 CONTINUE
CONTINUE
IF(CABS(RAMAX).LT.ERRO) GO TO 17
PROCESO DE ELIMINACION **********************
 IF(LR.EG.LC) 60 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)
 G(LC,I)=TEMP
    DO 11 I=1,N
 A(LC,I)=A(LC,I)/RAMAX
 LI C(LC,I)=C(LC,I)/RAMAX
  DO 13 I=1.N
    IF(I.EG.LC) GO TO 13
    ATEMP=A(I,LC)
    DO 12 J=1.N
    A(I,J)=A(I,J)-ATEMP*A(LC,J)
   C(I,J)=C(I,J)-ATEMP*C(LC,J)
   CONTINUE
    MVR(LC)=LC
    MVC(LC)=LC
    CONTINUE
    IDET=1
    RETURN
    IDET=Ø
    RETURN
    END
SUBRUTINA PARA MULTIPLICAR 2 MATRICES COMPLEJAS ******
#### X=MATRIZ DE ORDEN MXN *********************
### Y=MATRIZ DE ORDEN NXL **********************
____ 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) = EMPLX(0.0,0.0)
    DD 30 K=1,N
    Z(J,I)=Z(J,I)+X(J,K)*Y(K,I)
    CONTINUE
    RETURN
    END
BUBRUTINA PARA SUMAR 2 MATRICES COMPLEJAS **********
```

```
BESS AMMATRIZ DE ORDEN MXN ***********************
BEST B=MATRIZ DE ORDEN MXN **********************
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)
    CONTINUE
    RETURN
    END
SUBRUTINA PARA RESTAR 2 MATRICES COMPLEJAS *********
#### X=MATRIZ DE ORDEN MXN **#*******************
#### Y=MATRIZ DE ORDEN MXN **********************
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
    DD 20 J=1,N
    Z(I,J) = X(I,J) - Y(I,J)
    CONTINUE
    RETURN
    END
*********************************
**** SUBRUTINA QUE TRANSFORMA UN VALDR COMPLEJD *********
**** A FORMA POLAR ***************************
    SUBROUTINE REPO(Z.R.TE)
    COMPLEX Z
    PI=4.8ATAN(1.)
    A=REAL(Z)
    B=AIMAG(Z)
    IF(A) 10,15,10
    IF(B) 10,20,10
20
    R=0.0
    TE=0.0
    RETURN
    R=CABS(Z)
29
    TE=ATAN2(B,A)
    TE=TE*180./PI
    RETURN
    END
FUNCION PARA CALCULAR LA FORMA INTEGRAL DE BESSEL ****
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
    WRITE(6,15)
    FORMAT(5X, 'ERROR EN LA FUNCION DE BESSEL')
    RETURN
    IF(X1) 10,30,30
MINE M ES EL NUMERO DE DIVISIONES (AREAS) *************
200
    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
     FOINBE=FOINBE+2.*DCDS(N1*DELTA*I-X1*DSIN(DELTA*I))
99
    1 +4.*DCDS(N1*DELTA*(I+1)-X1*DSIN(DELTA*(I+1)))
     FOINBE=FOINBE*DELTA/(3.*PI)
     RETURN
     END
EXXX FUNCION PARA CALCULAR LA PRIMERA DERIVADA DE BESSEL XX
**** MEDIANTE LA RELACION DE RECURRENCIA **************
     REAL FUNCTION XJNDER(N3,X3)
     REAL & B FOINEE
     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
48
    XJNDER=(FOINBE(N3-1, X3)-FOINBE(N3+1, X3))/2,
    RETURN
    END
E**** FUNCION PARA CALCULAR LAS INTEGRALES DE PI O GJ ******
    REAL FUNCTION XINTE(R,NP,PNM,N1)
    REAL*8 FOINBE, XJNDER
    XINTE=Ø.Ø
    IF(R) 10,10,20
TO.
    WRITE(6,15)
8.5
    FORMAT(5X, 'ERROR EN LA FUNCION XINTE')
    RETURN
*** M ES EL NUMERO DE DIVISIONES (AREAS) ************
28
    M=20
    DELTA=R/M
    XA=PNM*DELTA/R
    IF(N1) 70,80,70
88
    XINTE=(FDINBE(NP.0.))**2+4.*(FDINBE(NP.XA))**2
                          +(FDINBE(NP,PNM))**2/M
    DD 60 II=2,M-2,2
    I=II
    XINTE=XINTE+2.*(FOINDE(NP.XA*I))**2/I
              +4.*(FOINBE(NP, XA*(I+1)))**2/(I+1)
    XINTE=XINTE/3.
    RETURN
    XINTE=(XJNDER(NP.Ø.))**2+4.*(XJNDER(NP.XA))**2
                          +M*(XJNDER(NP,PNM))**2
    DO 90 JJ=2,M-2,2
    J=JJ
    XINTE=XINTE+2.*J*(XJNDER(NP.XA*J))**2
              +4. *(J+1) *(XJNDER(NP, XA*(J+1))) **2
    XINTE=XINTE*DELTA**2/3.
    RETURN
    END
FUNCION PARA CALCULAR LAS INTEGRALES DE XJI ********
    REAL FUNCTION XXJI(RA,RB,NN,NP,PNM,FPG,N1)
    REAL*8 FOINBE, XJNDER
    XXJI=0.0
```

```
IF(RA) 10.10.15
115
     IF(RB) 10.10.20
18
     WRITE(6.5)
     FORMAT(5X, 'ERROR EN LA FUNCION XXJI')
D: * * M ES EL NUMERO DE DIVISIONES (AREAS) *************
28
     M=20
     DELTA=RB/M
     XA=PNM*DELTA/RA
     XB=PPQ*DELTA/RB
     IF(N1) 70.80.100
     XXJI=FOINBE(NN,0.)*FOINBE(NP,0.)+4.*FOINBE(NN,XA)*
          FOINBE(NP, XB)+FOINBE(NN, PNM) *FOINBE(NP, PPQ)/M
     DO 85 III=2,M-2,2
   I=III
     XXJI=XXJI+2.*FOINBE(NN,XA*I)*FOINBE(NP,XB*I)/I+4.*
          FOINBE(NN, XA*(I+1)) *FOINBE(NP, XB*(I+1))/(I+1)
     XXJI=XXJI/3.
    RETURN
     XXJI=XJNDER(NN,0.)*XJNDER(NP,0.)+4.*XJNDER(NN,XA)*
          XJNDER(NP,XB)+XJNDER(NN,PNM)*XJNDER(NP,PPD)*M
     DO 75 JJJ=2,M-2,2
   J≕JJJ
     XXJI=XXJI+2.*XJNDER(NN,XA*J)*XJNDER(NP,XB*J)*J+4.*
          XJNDER(NN,XA*(J+1))*XJNDER(NP,XB*(J+1))*(J+1)
     XXJI=XXJI*DELTA**2/3.
     RETURN
IGG:
    IF(N1.GE.10) THEN
     XXJI=FOINBE(NN.Ø.)*XJNDER(NP.Ø.)+4.*FOINBE(NN.XA)*
          XJNDER(NP, XB)+FOINBE(NN, PNM) *XJNDER(NP, PPG)
     DO 105 KK=2.M-2.2
     K=KK
     XXJI=XXJI+2.*FOINBE(NN.XA*K)*XJNDER(NP.XB*K)+4.*
          FOINBE(NN, XA*(K+1))*XJNDER(NP, XB*(K+1))
     ELSE
     *XJI=FOINBE(NP,0.)*XJNDER(NN,0.)+4.*FOINBE(NP,XB)*
          XJNDER(NN, XA) +FOINBE(NP, PPQ) *XJNDER(NN, PNM)
     DO 110 LL=2,M-2,2
     XXJI=XXJI+2. *FGINBE(NP, XB*L) *XJNDER(NN, XA*L)+4. *
          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 capitulo 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<sub>12</sub> la frecuencia de corte està dada por la ecu. 2.47 con la cual el usuario està 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 guiaonda circular.

- El algoritmo empleado para realizar la unificación de los modos, es tal que nos suministra una lista de los indices modales nm colocados en orden ascendente de acuerdo al valor de las raices 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 raices para los modos TEom y los TMom, 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 guias circulares; La explicación es sencilla, si se observan las expresiones para las matrices P. O y X, el lector notará que cuando los indices modales se anulan, n=0 para la guia 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 terminante y no permite obtener la inversa de una matriz.

```
CHIVO RA DA
```

\*

```
1.84
     3.05 4.20 5.31 6.41
                             7.50
                                    8.57 9.64 10.71
5.33
                 9.28 10.52 11.73 12.93 14.10 15.28
     6.70
          8.01
B. 53
     9.96 11.34 12.68 13.98 15.26 16.52 17.77
                                                19.00
1.70 13.17 14.58 15.96 17.31 18.63 19.94 21.22
                                                22.50
4.86 16.34 17.78 19.19 20.57 21.93 23.26 24.58
                                                25.89
    19.51 20.97 22.40 23.80 25.18
8:01
                                   26.54 27.88
1.16 22.67 24.14 25.59
                       27.01 28.40
                                   29.79 31.15
1.31 25.82 27.31 28.76
                       30.20 31.61
                                   33.01
                                         34.39
                                                35.76
7.45 28.97
          30.47
                 31.96
                       33.38 34.B1
                                    36.22
                                          37.62
                                                39.00
0.60 32.12 33.62
                 35.10 36.56 37.99
                                   39.42
                                         40.83
                                                42.22
5.83
    5,13
           6.38
                 7.58
                       8.76
                              9.93
                                   11.07 12.22
                                                13.34
7-01
           9.76 11.06
                       12.35 13.59
     B.41
                                   14.83
                                         16.04
                                                17.25
0.17 11.62 13.01
                 14.37
                                                20.79
                       15.68 17.00
                                   18.27 19.55
32 14.79 16.22 17.61
                       19.00 20.32
                                   21.65 22.94
1.45 17.95 19.39 20.82
                       22.20 23.58
                                   24.91
                                          26.26
7.63 21.12
           22.59
                       25,44
                 24-02
                             26.82
                                         29.54
                                   28.20
                                                30.90
2.74 24.26
          25.73 27.19 28.60 30.02
                                   31.40
                                         32.79
5.92 27.42 28.92
                30.37 31.83 33.23
                                   34.65 36.02
1.22 30.56 32.04 33.53 34.96 36.41
                                   37.81 39.23 40.60
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
     1, 1
4,
     1, 0
1,
     2, 0
     1, 1
5,
     1, 0
2,
     2, 0
1,
     2, 1
     1, 0
6,
4,
     1, 1
3,
     2, 0
     2, 1
     3,
        (7)
7,
    1, 0
     1,
        1
4,
     2,
        Ø
8,
    1, Ø
3,
    2,
        1
     1,
        1
    3,
        Ø
    3,
        1
E,
    2,
        Ø
B.
    I,
        Ø
できるいっちゃ
    2,
        1
     1,
        1
    3,
        Ø
        1
    4,
        Ø
        Ø
    I.
        1
        1
THE PASSED
        Ø
        Ø
    3,
        1
    4,
        Ø
    4,
        1
        1
        1
        0
        0
        1
        0
    4,
        1
        1
     5,
        0
```

0

# 4.1 Ejemplo 1 del Diseno de un Aplicador

En esta parte del capítulo tiene como objetivo realizar el estudío 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.

DATOS DE ENTRADA DASO A

DISENO DE APLICADOR DE MICROONDAS CILINDRICO

	APLICADO	R: TE	JIDO
PERMITIVIDAD DIELECTRICA	20.0 0	.0 5	52.0 -15.0
PERMEABILIDAD MAGNETICA	70 7 70		1.0 0.0
DIAMETRO GUIA (MM.)	16.0	5	76.0
NUMERO DE MODOS	5	18	10
FREC. DE OPERACION (GHZ.)	2.45		

DISENO DE APLICADOR DE MICROONDAS CILINDRICO

	APLICA	ADOR.	LEGID	J
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		66.0	
NUMERO DE MODOS	5		180	
FREC. DE OPERACION (GHZ.)	2.45			

#### 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 \$22(1,1), que significa el coeficiente de reflexión del modo fundamental TE::, y cuyas gráficas son adicionadas a las que muestran la magnitud del campo electrico 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 electrico 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.

	(MM) NGULAR (1	7.6 SRA) 90	135	EJE Z (MM)
0.39 0.36 0.31 0.28 0.26 0.25 0.25 0.23	0.40 0.33 0.29 0.27 0.25 0.24 0.24 0.23	0.40 0.35 0.30 0.27 0.26 0.25 0.24 0.24	0.41 0.38 0.32 0.27 0.27 0.25 0.24 0.23	0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0
PLAND RADIAL CURVA		0.1 GRA) 90	135	EJE Z (MM)
0.33 2.32 9.29 9.27 9.25 9.24 9.23 9.22 9.21	0.28 0.26 0.25 0.24 0.23 0.23 0.22 0.22	0.32 0.30 0.27 0.26 0.25 0.24 0.23 0.23	Ø.36 Ø.36 Ø.31 Ø.28 Ø.26 Ø.25 Ø.23 Ø.23	0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0

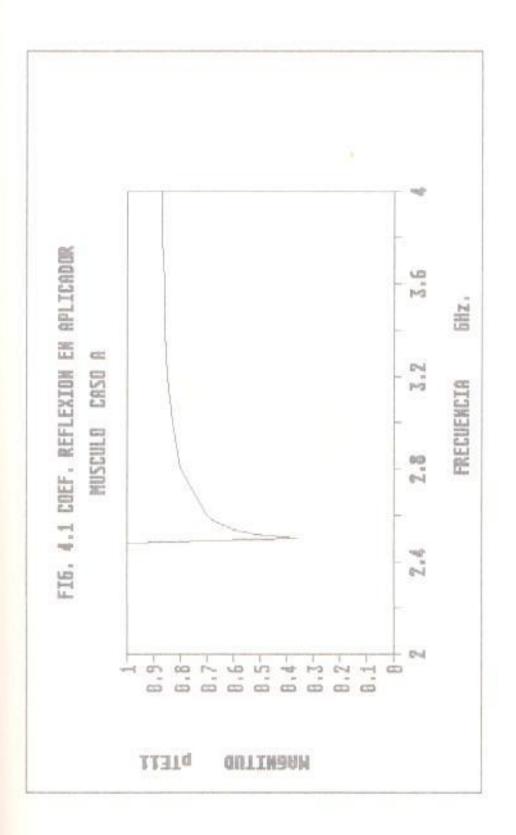
# S DE SALIDA CASO B

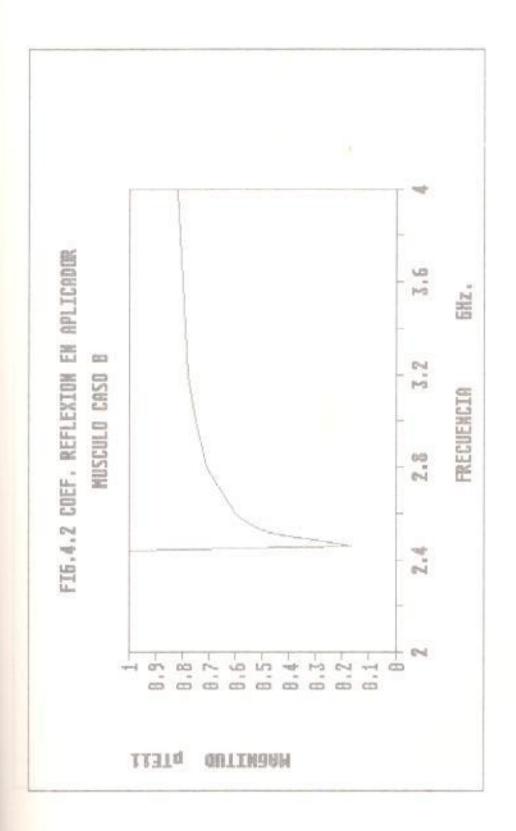
MA.CO.REF FA.CO.REF MA.CO.TRA FA.CO.TRA 0.28E+00 0.12E+01 0.45E-01 0.25E+01

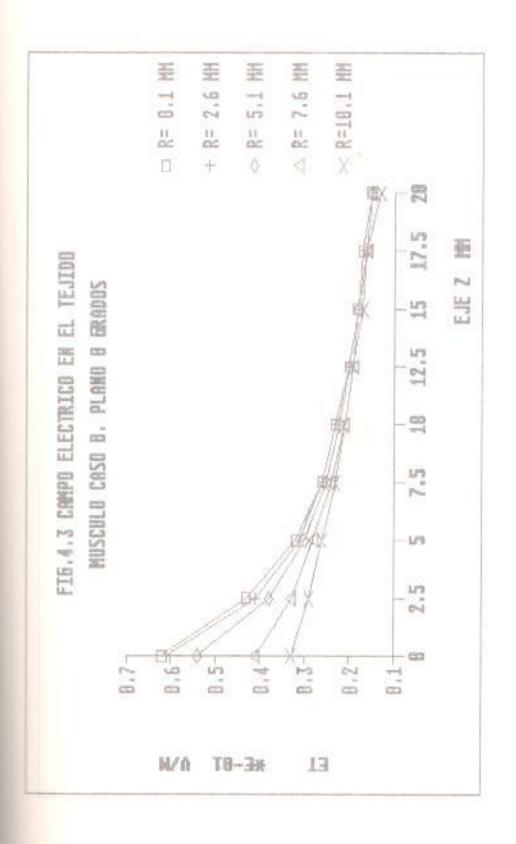
## CAMPO ELECTRICO TOTAL \*E-01 V/M

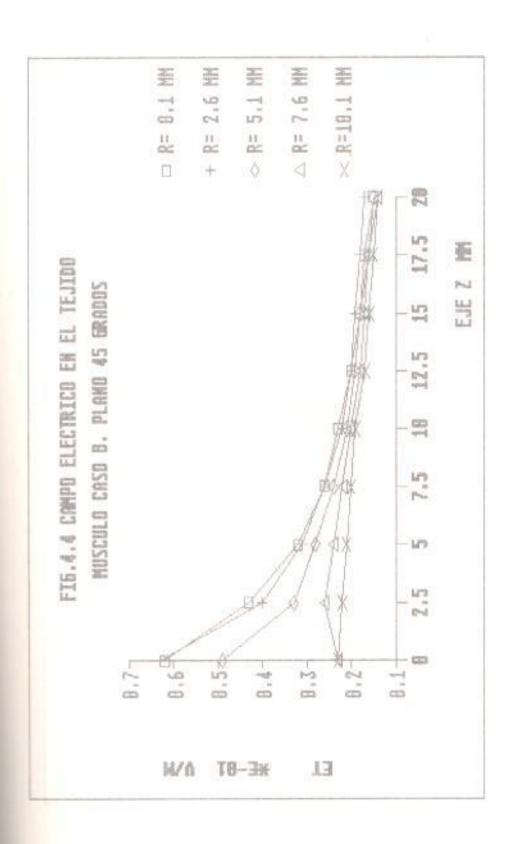
PLAND HADIAL				Teres Trans
Ø	ANGULAR (	5HA ]	135	EJE Z (MM)
0.62 0.43 0.32 0.26 0.23 0.20 0.10 0.17 0.17	Ø.62 Ø.43 Ø.32 Ø.26 Ø.23 Ø.20 Ø.18 Ø.17 Ø.15	0.62 0.43 0.32 0.26 0.23 0.20 0.18 0.17 0.15	0.62 0.43 0.32 0.26 0.23 0.20 0.18 0.17 0.15	0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0
PLAND RADIAL	(MM)	2.6		
	ANGULAR (		1.70	EJE Z (MM)
Ø	45	90	135	
0.61 0.41 0.31 0.26 0.23 0.20 0.18 0.17 0.15	0.63 0.40 0.31 0.26 0.22 0.20 0.18 0.17 0.15	0.65 0.41 0.31 0.26 0.22 0.20 0.10 0.17 0.15	0.63 0.42 0.32 0.26 0.23 0.20 0.18 0.17 0.15	0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0
PLAND RADIAL	(MM) ANGULAR (			EJE Z (MM)
23	45	90	135	
0.54 0.38 0.30 0.25 0.22 0.20 0.18 0.16 0.15	0.49 0.33 0.28 0.24 0.21 0.19 0.18 0.16 0.15	0.56 0.35 0.28 0.24 0.21 0.19 0.18 0.16 0.15	0.61 0.39 0.30 0.25 0.22 0.20 0.18 0.16 0.15	0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0

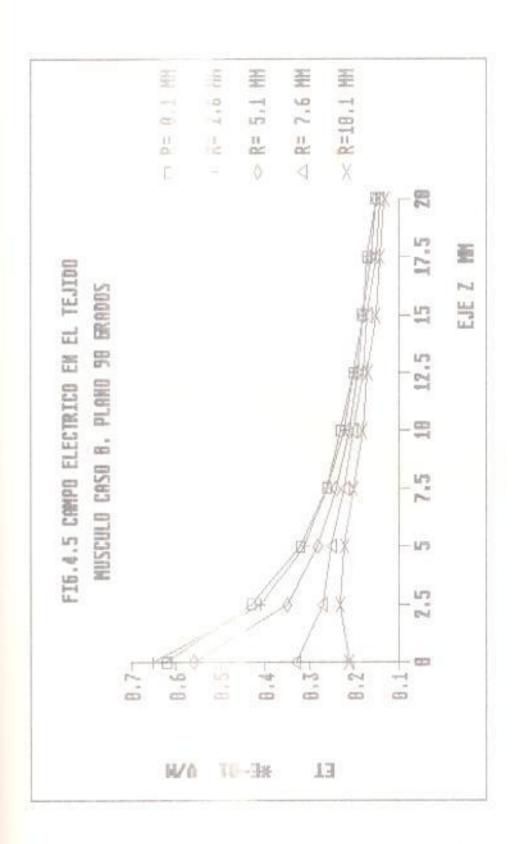
PLAND RADIA CURVA	AL (MM) ANGULAR ( 45	7.6 GRA) 90	135	EJE Z (MM)
0.41 0.33 0.28 0.24 0.21 0.19 0.18 0.16	0.23 0.26 0.24 0.22 0.20 0.18 0.17 0.16 0.14	0.33 0.27 0.25 0.22 0.20 0.18 0.17 0.15 0.14	0.47 0.34 0.28 0.24 0.21 0.19 0.17 0.16 0.15	0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0
PLAND RADIA	L (MM) 1 ANGULAR (			OFFICE COMMON
2	45	98	135	EJE Z (MM)
0.33 0.29 0.26 0.23 0.21 0.19 0.17 0.16 0.14	0.23 0.22 0.21 0.20 0.19 0.17 0.16 0.15	0.21 0.23 0.22 0.20 0.18 0.17 0.15 0.14 0.13	0.32 0.30 0.24 0.23 0.20 0.18 0.17 0.15	0.0 2.5 5.0 7.5 10.5 12.5 15.0 17.5 20.0

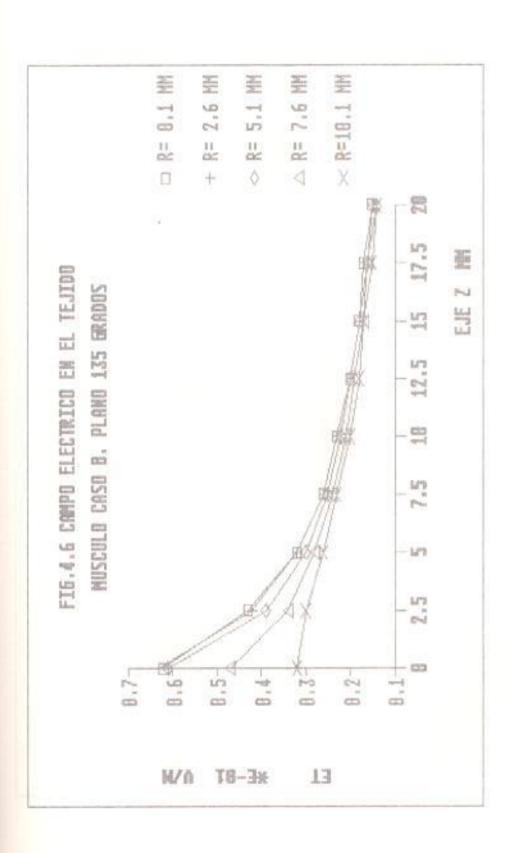


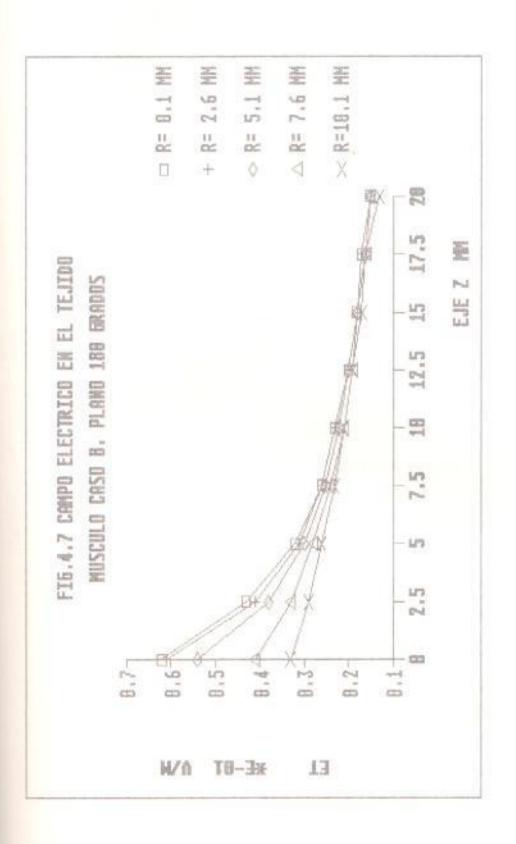












## 4.2 Ejemplo 2 del Diseno de un Aplicador

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.

DISENO DE APLICADOR DE MICRODADAS 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

DISEND DE APLICADOR DE MICROCNDAS 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	17070001

### 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 S22(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 electrico 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 e y corresponde a la mejor alternativa.

TOS 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-D1 V/M

HEALT OF THE PROPERTY.					
PLAND RADIA	(MM) (	1.1			
	ANGULAR (			EJE Z (MM	)
Ø	45	90	135		
0.66	0.66	12.66	0.66	0.0	
0.56	0.56	D.56	0.56	5.0	
0.48	Ø.48	Ø.48	0.48	10.0	
0.42	0.42	0.42	0.42	15.0	
0.38	0.38	Ø.38	0.38	20.0	
0.35	8.35	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	
W. C. W. S.					
PLAND RADIA		6.1		F 4 F 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	in
CURVA	ANGULAR (		10000	EJE Z (MM	13.
0	45	90	135		
	m 17	0.68	0.67	0.0	
2.66	Ø.67	0.55	0.55	5.0	
0.55	Ø.55	0.47	0.47	10.0	
0.47	0.46	0.41	0.41	15.0	
0.42	0.41	0.37	0.37	20.0	
0.38	0.37	0.34	0.35	25.0	
0.35	0.34	0.32	0.32	30.0	
0.32	0.32		0.30	35.0	
0.30	0.30	0.30	10.00		
PLAND RADIA	I CMM) 1	2.1			
CURVA	ANGULAR (	GRA)		EJE Z (MN	1)
Ø	45	90	135		
			22.50		
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	
10.37	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	
PLANG RADIA	OF CMM V	H.1			
	A ANGULAR			EJE Z (M	M.
Series No.					

120	45	90	135	
0.54 0.46 0.42 0.38 0.35 0.33	0.47 0.39 0.37 0.35 0.33 0.32 0.30 0.29	0.57 0.43 0.37 0.43 0.32 0.31 0.30 0.29	0.63 0.49 0.42 0.38 0.35 0.35 0.33	0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 35.0
PLAND RADIAL CURVA	(MM) Z ANGULAR (	4.1 GRA) 90	135	EJE Z (MM)
Ø.44 Ø.41 Ø.38 Ø.36 Ø.34 Ø.32 Ø.31	0.26 0.29 0.31 0.31 0.30 0.30 0.29	0.36 0.32 0.31 0.30 0.29 0.29 0.29 0.28	0.51 0.43 0.38 0.35 0.33 0.31 0.30 0.29	0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0

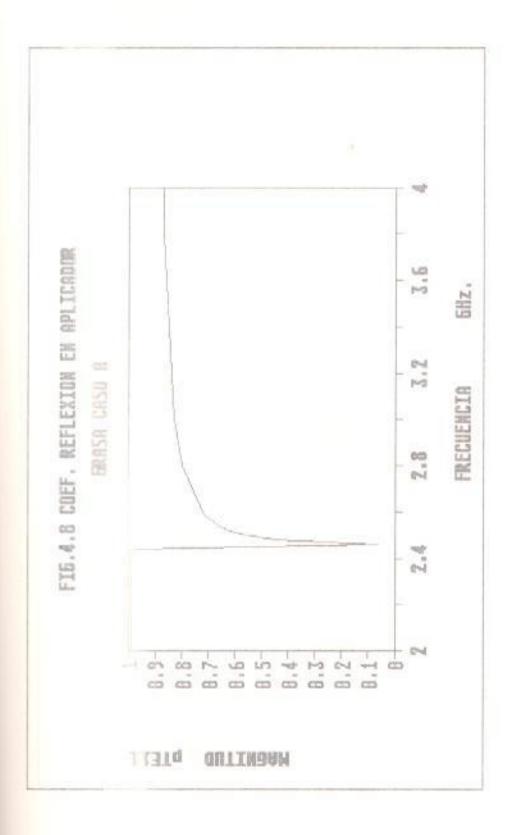
> MA.CO.REF FA.CO.REF MA.CO.TRA FA.CO.TRA 0.57E+00 -0.75E+01 0.53E-01 -0.34E+01

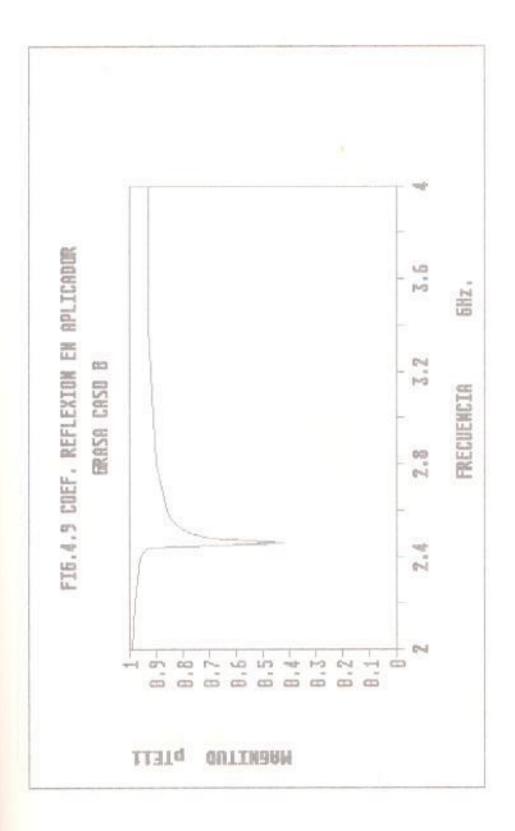
CAMPO ELECTRICO TOTAL \*E-Ø1 V/M

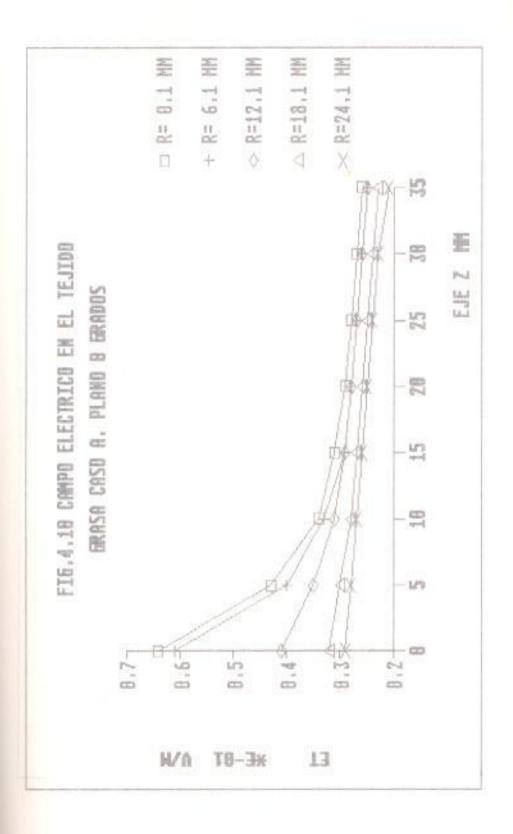
PLAND RADIA CURVA	AL (MM) A ANGULAR I 45	Ø.1 GRA) 9Ø	135	EJE Z	(MM)
0.46 0.43 0.34 0.31 0.29 0.29 0.28	0.46 0.43 0.34 0.31 0.29 0.29 0.28	0.46 0.43 0.34 0.31 0.29 0.29 0.29	0.46 0.43 0.34 0.31 0.29 0.29 0.28 0.28	0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0	
PLANG RADIA	L (MM)	6.1			
CURVA Ø		GRA)	135	EJE Z	( MM.)
0.41 0.40 0.33 0.29 0.28 0.28 0.28	0.42 0.39 0.33 0.30 0.29 0.28 0.28	0.47 0.40 0.33 0.30 0.29 0.20 0.20	0.46 0.42 0.34 0.31 0.29 0.28 0.28	0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0	
PLANO RADIA					
Ø CURVA	ANGULAR (	GRA)	135	EJE Z	(MM)
0.37 0.35 0.31 0.29 0.28 0.28 0.27 0.27	0.29 0.30 0.29 0.28 0.27 0.27 0.27 0.27	0.35 0.33 0.30 0.29 0.28 0.27 0.26 0.26	0.39 0.37 0.32 0.30 0.28 0.27 0.27	0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0	

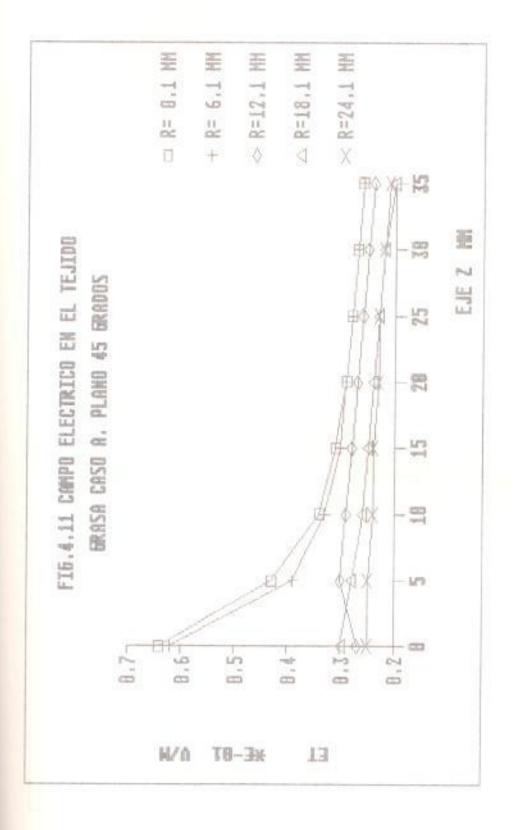
PLAND RADIAL (MM) 18.1

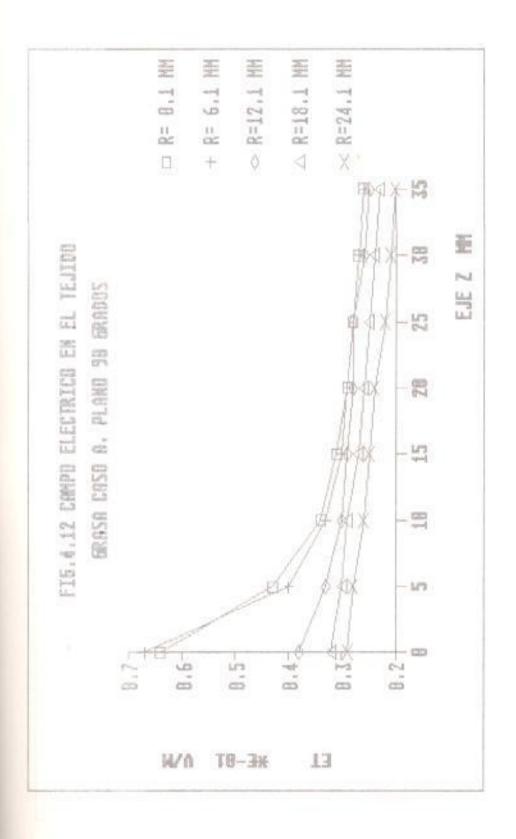
CURVA	ANGULAR (	GRA)		EJE Z (MM)
Ø	45	90	135	
0.31	0.28	0.31	0.33	0.0
0.30	0.26	0.29	0.32	5.0
Ø.28 Ø.27	0.26	0.27	0.30	10.0
0.27	0.25	0.25	0.27	20.0
0.26	0.25	0.25	0.26	25.0
0.26	0.25	0.24	0.25	30.0
0.26	0.25	0.24	0.25	35.0
PLAND RADIAL		4.1 GRA)		FIF 7 (NM)
Ø	ANGULAR (	90	135	EJE Z (MM)
0.27	0.24	0.26	0.27	0.0
0.26	0.24	0.24	D-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	07-21	0.24	25.0
0.24	0.22	0.21	0.23	30.0
0.23	0.22	0.20	0.23	35.0

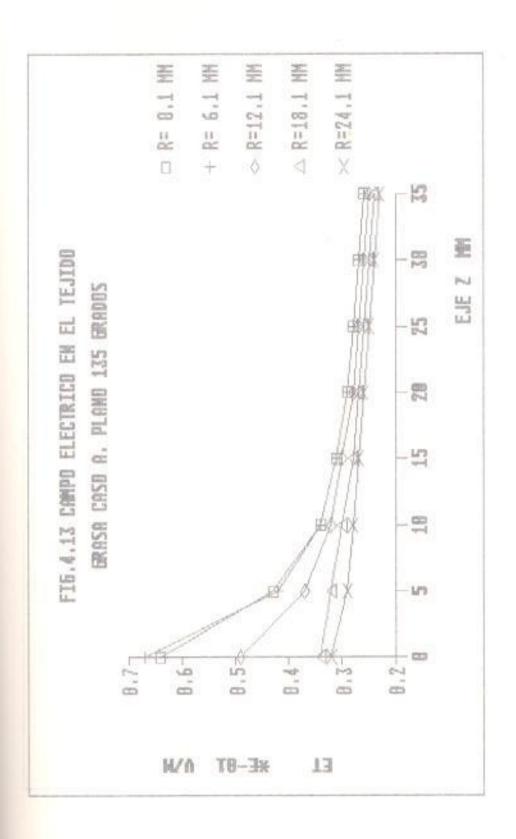


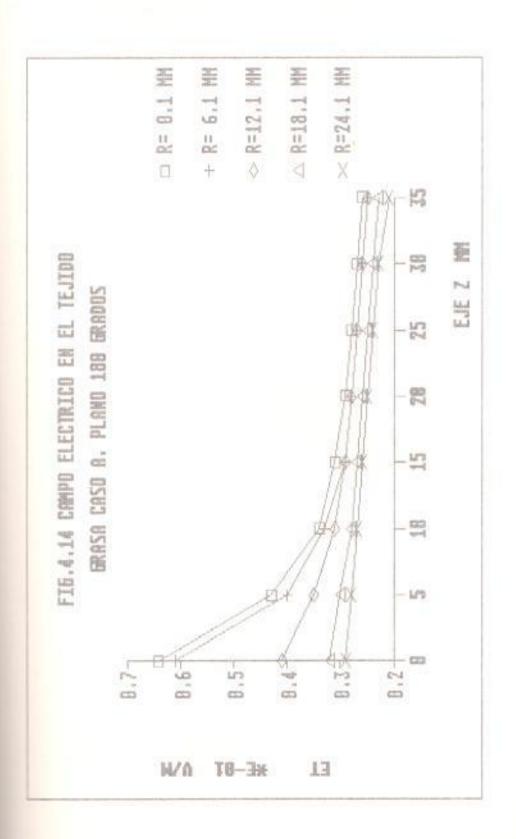












#### 4.3 Análisis de Resultados

Del conjunto de datos de salida del programa cuando el tejido irradiado, con micrrondas 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<sub>11</sub> mayor en relación al del caso b.
- De forma paralela los valores del campo electrico 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 diseno más óptimo.
- La comparación de las gráficas 1 y 2 correspondientes al coeficiente de reflexión del modo fundamental  $TE_{11}$ , elemento S22(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 diseno.

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 electromagneticos y ultrasónicos en el área Biomedica es sin lugar a dudas el Tratamiento del Cáncer considerada por casi dos centurías como la enfermedad responsable de un alto indice de mortalidad humana a nivel mundial.

El objetivo de este capitulo es anotar varias ideas y conceptos básicos acerca de la tecnica mas 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 Câncer 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 Duimioterapia. De las investigaciones de fines del siglo anterior se conoce sinembargo que ha sido notorio el interes por estudiar el efecto que el calor ejerció en la regresión parcial o total de los tumores, pero sucedió que en epocas 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 ano 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 titànico esfuerzo de una multiplicidad de profesionales e instituciones a nivel internacional, hoy en dia los

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

En la actualidad la aplicabilidad clinica 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 oncologistas concuerda en la magnifica 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,
Cirugia 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 beneficos 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 sensitividad al calor.
- La pobre circulación de sangre, a su vez es causante de un bajo nivel de pH en las celulas malignas, así su sensitividad al calor aumenta.
- La termotolerancia entre las celulas normales y
  las cancerosas es relativamente comparable, no
  obstante el tratamiento hipertermico fraccionado
  produce la eliminación de las últimas en altisimo
  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 tecnicas quirúrgicas. Ver ref. (9).

Esto en adición a que, al menos hasta ahora, no han aparecido agentes cancerigenos o mutogenicos 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 metodos ultrasónicos, de radiofrecuencia, de microondas, de carácter externo e interno.

Basicamente las tecnicas 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 bano 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 energia en los tejidos de pobre contenido de agua, (hueso grasa), en comparación en los de alto contenido de liquido, (músculo, piel, pulmón, higado); Además la profundidad de penetración de la energia 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 energia vertida sobre el tejido ?.
- Cómo disenar 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 dielectrica, 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 electromagnetica y ultrasónica.

Se puede determinar por ejemplo la distribución espacial del campo electromagnetico 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 disenados.

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 energia 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 energia 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 energia al tejido. El sistema aplicador-tejido que emplea dispositivos de uso externo, (guias de onda), puede tener dos configuraciones:

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

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

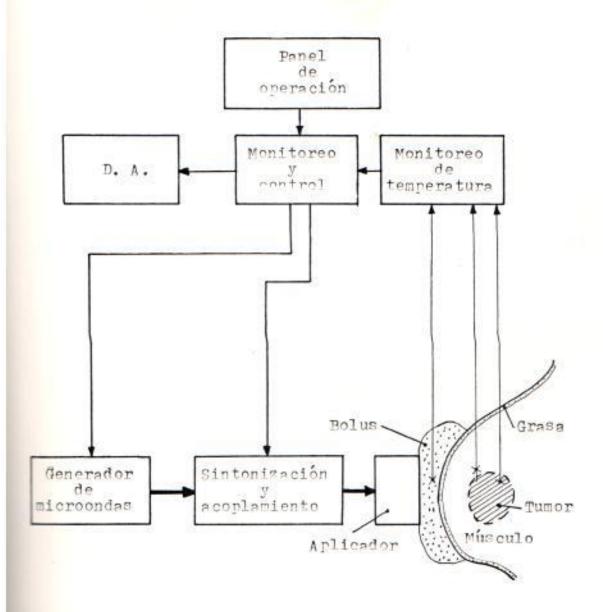


FIG. 5.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA HIPERTERMICO APLICADO AL TRATAMIENTO DE TUMORES.

## 5.2.1 Breve estudio de los tejidos biológicos sometidos a campos electromagneticos

Cuando la materia viva es expuesta a la energia electromagnetica no ionizante (no permite la liberación de cargas libres en los Atomos), se producen en su interior dos fenómenos: termicos y no termicos.

Los primeros se manifiestan mediante la disipación de energia calorifica inducida en el tejido biológico, y su efecto es inmediato. Los otros en cambio, se presentan a traves de alteraciones y mutaciones de las celulas, su aparición es detectada a largo plazo.

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

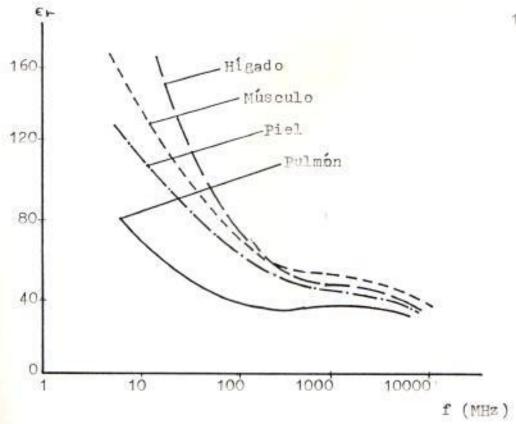
- contenido de agua de los tejidos.
- soluciones proteinicas de las celulas.
- acción de la membrana celular.

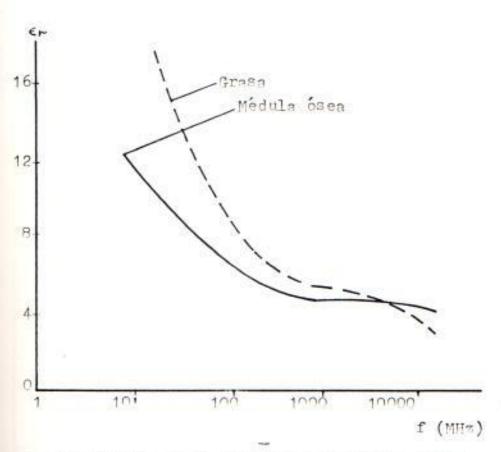
De alguna forma, que no nos compete analizar ellos son los que determinan las características electricas y termicas de los tejidos.

Se menciona por ejemplo que aquellos tejidos ricos en agua presentan una alta constante dielectrica, no asi 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 Absortion Rate), en cuyo cálculo hay la posibilidad de emplear una multiplicidad de metodos que no va al caso mencionar, por lo pronto se presentarán dos fórmulas:





PIG. 5.2 PERMITIVIDAD RELATIVA DE TEJIDOS SEGUN SU COMPTEJDO DE AGUA.

Constante dieléctrics de tejidos a 37ºC frecuencia (MHz)

The state of the s					The second secon		Contraction of the Contraction o
	50	100	200	400	700	1000	3000
Músculo	85-97	71-76	99	52-54	52-53	49-52	45-48
Múse. Corazón			59-63	52-56	50-55		
Higado	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
		Condi	Conductividad	(mmhos/cm)	a 37°c		
Musculo	6.80-8.85	100	9.52-10.5	9.52-10.5 11.1-11.8 12.7-13.7 12.7-13.3 21.7-23.3	12.7-13.7	12.7-13.3	21.7-23.3
Múse, Corazón			8.7-10.5	10.5-11.8	10.5-11.8 10.5-12.8		
Higado	5.13-5.78	5.59-6.49	60.6-19.09	7.69-9.52	8.7-11.8	9.43-10.2	20.0-20.4
qimon	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	0.29-0.95 0.36-11.1		0.83-1.49 1.11-2.27	1.11-2.27
Wédula 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-Poster (11)

SAR ~ C \* (DT/Dt)

donde:

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

DT/Dt es la pendiente instantànea de la Temperatura vs tiempo, en °C/s. SAR tasa de absorción en W/Kg.

Expresión válida para situaciones experimentales tomada de (6).

SAR " a \* |Et|= / ( 2\*8 )

donde:

ø es la conductividad en mhos/m. 8 la densidad del tejido en Kg/m³. Et el campo electrico 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 parametro de interes en toda aplicación, conforme a (6) es:

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

donde:

o es la conductividad del tejido.

Or es su permitividad relativa.

D profundidad de penetracion en m.

La constante dielectrica 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 energia 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 dificil acceso, por medios no invasivos a traves del imaginamiento de los tejidos. Ver (4) y (5).

Los resultados obtenidos hasta ahora no significan un exito contundente, sinembargo 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 Termografia 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 sensitividad 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 mayoria 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 Tomografia con microondas, proceso en el cual es aprovechada la permitividad compleja local de los tejidos y sirviendose de los sistemas computarizados de adquisición de datos se reconstruyen imágenes del tejido, pero en la actualidad estas tecnicas ofrecen imágenes de baja resolución.

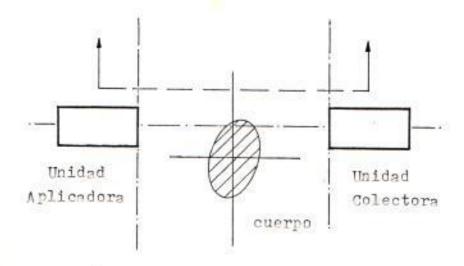
Los procesos tomográficos con microondas desarrollados son de dos tipos:

- Tomografía por Transmisión.
- Tomografia por Difracción.

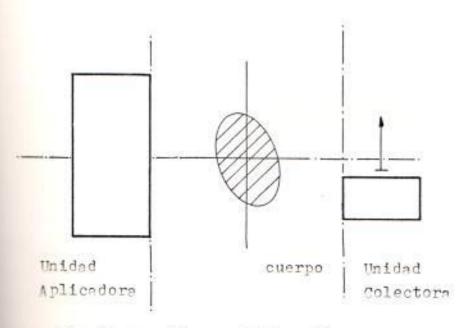
En la figura 5.4a y 5.4b se muestran el principio básico de operación de ambos.

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) Tomografia por Transmisión



b) Tomografía por Difracción

PIG. 5.4 PRINCIPIOS BASICOS DE TOMOGRAFIA COM MICROCHDAS.

Bolomey, Jofre y Peronnet (4)

Equipos de frecuencia modulada son utilizados para enviar la energia entre el aplicador y el colector buscando el camino mán directo. Al colector llega la energia 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 intimamente 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 sinembargo, 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/cm².
- 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 guias 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 guias de cualquier geometria, así por ejemplo en las de sección rectangular, circular etc..
- Para el caso de estudio, en guias de apertura circular, se llegó a determinar que el Análisis Modal no provee una solución si los modos TEom y los TMom no son excluídos del cálculo, porque impiden la obtención de la Inversa de una Matriz cuando en las matrices X, P y G 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 disenar aplicadores de microondas de geometria cilindrica. Para lograrlo podría utilizarce algún modelo Multicapas del tejido.
- Partiendo del análisis propuesto y con la ayuda del programa se estaría en capacidad de conseguir investigar el diseno de unidades aplicadoras de microondas de apertura circular multielementarias.
- Efectuar un estudio comparativo entre los resultados obtenidos en el caso de guias 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.

## BIBLIOGRAFIA

- 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.
- 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.
- BECERRA, C.; Diseno de Aplicadores de Multielementos para Hipertermia de Microondas; Inf. ETSIS/GEAM Universidad Politecnica de Madrid, Espana; 1988.
- 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. BDLOMEY, J., IZADNEGAHDAR, A., JOFRE, L., PICHOT, C. PERONNET, G., y SOLAIMANI, M.; Microwave Difraction 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.

- 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.
- HAHN, G.; Hyperthermia for the Engineer: A Short Biological Primer; IEEE Trans. Biomed. Engin., 1984.
   Vol. BME-31, N.1, pp. 3-8.
- 10. REBULLAR, 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 Discontinuites by Modal Analysis. IEEE Trans. Microw. Theory and Techn. Vol. MTT-15, N.9, pp.508-517.