

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ASPECTOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS Y DIDÁCTICO-PEDAGÓGICOS DE
LA ENSEÑANZA DEL ELECTROMAGNETISMO**

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

FRANCISCO TZIRÍN JOCHOLÁ

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO-ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1996

**PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central**

DB
T(3877)
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**ASPECTOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS Y DIDÁCTICO-PEDAGÓGICOS
DE LA ENSEÑANZA DEL ELECTROMAGNETISMO,**

tema que me fuera asignado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica.


FRANCISCO TZIRIN JOCHOLA.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

| | |
|-------------------|---|
| DECANO | ING. JULIO ISMAEL GONZÁLEZ PODSZUECK |
| VOCAL 1ro. | ING. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ GUERRA |
| VOCAL 2do. | ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLÓRZANO |
| VOCAL 3ro. | ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRÍA MÉNDEZ |
| VOCAL 4to. | Br. FERNANDO WALDEMAR DE LEÓN CONTRERAS |
| VOCAL 5to. | Br. PEDRO IGNACIO ESCALANTE PASTOR |
| SECRETARIO | ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| DECANO | ING. JULIO ISMAEL GONZÁLEZ PODSZUECK |
| EXAMINADOR | ING. GUSTAVO BENIGNO OROZCO GODÍNEZ |
| EXAMINADOR | ING. MARIO RENATO ESCOBEDO MARTÍNEZ |
| EXAMINADOR | ING. PEDRO ENRIQUE KUBES ZACEK |
| SECRETARIO | ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ |

Guatemala, 30 de Septiembre de 1,996

Señor Director:
Ing. Edgar F. Montúfar Urizar.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala.
Su despacho.

Señor Director:

Tengo el agrado de informarle que he revisado el trabajo de tesis titulado: **Aspectos Técnico-Científicos y Didáctico-Pedagógicos de la Enseñanza del Electromagnetismo**, desarrollado por el estudiante **Francisco Tzirin Jocholá**, y considero que cumple con los objetivos planteados, por lo que me permito recomendarlo para que sea aprobado como tesis de graduación.

Por lo tanto, el autor de ésta tesis y, yo, como su asesor, nos hacemos enteramente responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,


Ing. Enrique E. Ruiz Carballo.
ASESOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 4 de octubre de 1,996

Señor Director
Ing. Edgar F. Montúfar Urizar
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director.

Me permito dar aprobación al trabajo de tesis del señor Francisco
Tzirín Jocholá, titulada: Aspectos Técnico-científicos y
didáctico-pedagógicos de la enseñanza del electromagnetismo, por
considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. José Luis Herrera Gálvez
Coordinador Area Electrotecnia

JLHG/sdem.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO AMERICANO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

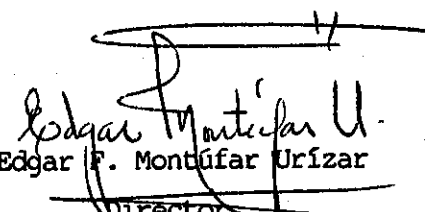


FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de tesis del estudiante Francisco Tzirín Jocholá, titulada: Aspectos Técnico-Científicos y Didáctico-Pedagógicos de la Enseñanza del Electromagnetismo, procede a la autorización del mismo.


Ing. Edgar F. Montúfar Urizar

Director

Guatemala, 9 de octubre de 1,996.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: Aspectos Técnico-Científicos y didáctico-Pedagógicos de la Enseñanza del Electromagnetismo, del estudiante Francisco Tzirín Jocholá, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:



Ing. Julio Ismael González Podszueck

Decano

Guatemala, 14 de octubre de 1,996.



No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes,
porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré,
siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia.

Isaías 41:10

DEDICATORIA

A:

DIOS Porque suyos son la gloria, el honor, el poder y la sabiduría.
Porque Jehová da la sabiduría y de su boca viene el conocimiento
y la inteligencia. Proverbios 2:6

MIS PADRES: Leonardo Tzirin Mucia & María del Pilar Jocholá de Tzirin.
Por su apoyo y sus sabios consejos. Por enseñarme a conducirme
correctamente en este largo y polvoriento camino por el que todos
debemos transitar.

MIS HERMANOS: Florinda, Rolando, José Angel, Irma Elisabeth, Norma Nohemi y
Elmer Leonel.
Con gratitud a su cariño, aprecio y apoyo.

MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE PROMOCIÓN

LA FACULTAD DE INGENIERÍA

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS

PATZÚN: Cuna que me vió nacer.

AGRADECIMIENTO

A:

DIOS Por haberme permitido llegar al final de esta carrea; porque su
diestra siempre me ha sostenido con fuerza y con poder.

MIS PADRES Porque con su ayuda desinteresada, y abnegados sacrificios ha
sido posible alcanzar esta meta.

MIS AMIGOS Porque de una u otra manera me brindaron su ayuda y apoyo
cuando lo necesité. En especial a Tomás Arnoldo Arévalo.

MI ASESOR DE TESIS: Ing. Enrique E. Ruiz Carballo. Por la colaboración brindada.

INDICE GENERAL

| TEMA | PÁGINA No. |
|------------------------------------|------------|
| ÍNDICE..... | i |
| INTRODUCCIÓN..... | iv |
| OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | vi |

PRIMERA PARTE *Generalidades*

CAPÍTULO I

PEDAGOGÍA Y DIDÁCTICA GENERAL

| | |
|--|---|
| I.1 CONCEPTO DE LA PEDAGOGÍA..... | 1 |
| I.1.1 LOS MÉTODOS DE LA PEDAGOGÍA..... | 1 |
| I.2 CONCEPTO DE LA EDUCACIÓN..... | 2 |
| I.3 CONCEPTO DE LA DIDÁCTICA..... | 3 |
| I.4 LA MOTIVACIÓN PEDAGÓGICA..... | 4 |
| I.4.1 CONCEPTO DE LA MOTIVACIÓN..... | 4 |
| I.4.2 EL INTERÉS..... | 4 |
| I.5 EL APRENDIZAJE Y EL ESTUDIO..... | 5 |
| I.5.1 EL MÉTODO..... | 6 |

EL MÉTODO CIENTÍFICO EXPERIMENTAL

| | |
|---|----|
| CONCEPTO DE CIENCIA..... | 7 |
| CONCEPTO DE TÉCNICA..... | 8 |
| I.6 EL MÉTODO CIENTÍFICO..... | 8 |
| I.6.1 PRINCIPIOS Y POSTULADOS DEL MÉTODO CIENTÍFICO..... | 8 |
| I.6.2 REGLAS DEL MÉTODO CIENTÍFICO..... | 8 |
| I.7 EL MÉTODO EXPERIMENTAL..... | 10 |
| I.7.1 ANÁLISIS DE LAS REGLAS DEL MÉTODO EXPERIMENTAL..... | 10 |

LA EXPERIMENTACIÓN DEMOSTRATIVA

| | |
|--|----|
| I.8 LA EXPERIMENTACIÓN DEMOSTRATIVA COMO UN MÉTODO DE ENSEÑANZA..... | 13 |
| 1.8.1 EN QUÉ CONSISTE UNA DEMOSTRACIÓN..... | 13 |
| 1.8.2 VENTAJAS DE LA EXPERIMENTACIÓN DEMOSTRATIVA..... | 13 |
| 1.8.3 OBJETIVOS DE UNA DEMOSTRACIÓN..... | 14 |
| 1.8.4 LA METODOLOGÍA DE LA DEMOSTRACIÓN..... | 15 |

SEGUNDA PARTE

La Didáctica del Electromagnetismo

CAPÍTULO II: **CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO**

| | |
|--|----|
| PROLEGÓMENOS..... | 17 |
| II.1 LÍNEAS DE CAMPO Y SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES..... | 18 |
| II.1.1 DEFINICIONES TEÓRICAS..... | 18 |
| II.2 SIMULACIÓN POR COMPUTADORA DE DISTRIBUCIONES DE CARGA, PARA LA VISUALIZACIÓN DE LÍNEAS DE CAMPO Y SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES..... | 24 |
| II.3 MEDIDAS DE CAMPOS ELÉCTRICOS ESTÁTICOS CON EL FET..... | 27 |
| II.4 MÉTODOS EXPERIMENTALES..... | 31 |
| II.4.1 GRAFICADOR DE LÍNEAS EQUIPOTENCIALES Y CAMPO ELÉCTRICO..... | 32 |
| II.4.2 MÉTODO ITERATIVO DE SOLUCIÓN A LA ECUACIÓN DE LAPLACE EN DOS DIMENSIONES..... | 34 |
| II.5 LA TIERRA Y SU ATMÓSFERA COMO UN CAPACITOR ESFÉRICO..... | 38 |
| II.5.1 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DEL CAMPO ELÉCTRICO DE LA TIERRA..... | 41 |
| II.6 MEDICIÓN POR COMPUTADORA DE LA DESCARGA DE UN CAPACITOR..... | 44 |
| DEFINICIONES TEÓRICAS DE CAMPO MAGNÉTICO E INDUCTANCIA..... | 47 |
| LEY DE INDUCCIÓN DE FÁRADAY..... | 49 |
| II.7 LEY DE LENZ-VERSIÓN CORTA..... | 50 |
| II.8 MEDICIÓN POR COMPUTADORA DEL VOLTAJE INDUCIDO EN UNA BOBINA POR LA QUE SE HACE PASAR UN IMÁN PERMANENTE..... | 53 |

CAPÍTULO III: *MATERIALES MAGNÉTICOS*

| | |
|---|----|
| DEFINICIONES TEÓRICAS..... | 55 |
| III.1 LA ENSEMANZA DEL TEMA DEL CAMPO MAGNETOSTATICO | |
| PROPUESTAS DE SOLUCIÓN A LAS DIFICULTADES..... | 58 |
| III.1.1 CUATRO TIPOS IDEALIZADOS DE MATERIALES MAGNÉTICOS..... | 59 |
| III.1.2 INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO CONTRA INDUCCIÓN MAGNÉTICA..... | 63 |
| III.2 UN MÉTODO DIRECTO PARA VISUALIZAR LA FASE DE TRANSICIÓN FERROMAGNÉTICA..... | 66 |
| III.2.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS..... | 66 |
| III.2.2 CONSTRUCCIÓN DEL EXPERIMENTO Y RESULTADOS..... | 67 |
| III.3 LA SUPERCONDUCTIVIDAD..... | 71 |
| III.3.1 ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS SUPERCONDUCTORES Y SU CORRELACIÓN TERMODINÁMICA..... | 71 |
| III.4 EXPERIMENTO CON UN ANILLO SUPERCONDUCTOR A LA TEMPERATURA DEL NITRÓGENO LÍQUIDO..... | 78 |
| III.4.1 OBSERVACIONES CUALITATIVAS..... | 79 |
| III.4.2 CORRIENTE PERSISTENTE O PERMANENTE..... | 81 |
| III.4.3 INDUCTANCIA PROPIA DEL ANILLO..... | 84 |
| III.4.4 CONCLUSIÓN..... | 86 |
| III.5 EL EFECTO MEISSNER..... | 87 |
| CONCLUSIONES..... | 90 |
| RECOMENDACIONES..... | 91 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 92 |

APÉNDICE A

| | |
|--|----|
| LISTADO DEL PROGRAMA DE SOLUCIÓN POR COMPUTADORA A LA ECUACIÓN DE LAPLACE EN DOS DIMENSIONES..... | 94 |
|--|----|

APÉNDICE B

| | |
|---|-----|
| INFORMACIÓN ACERCA DEL FUNCIONAMIENTO Y UTILIZACIÓN DEL IP-COACH..... | 109 |
| B.1 CÓMO ENTRAR Y SALIR DEL PROGRAMA IP-COACH..... | 110 |
| B.2 UTILIZACIÓN DE LAS TECLAS..... | 112 |
| B.3 SELECCIÓN DE UN PROGRAMA U OPCIÓN..... | 112 |
| B.4 CÓMO OBTENER AYUDA..... | 117 |

INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años, la enseñanza de la ingeniería eléctrica ha experimentado varios cambios de importancia en cuanto al contenido de las materias y el énfasis que se le da a cada uno de ellos. Esto se debe a los rápidos avances que experimenta la ciencia y la técnica en el campo de la ingeniería eléctrica. Y dado que el estudiante que cursa la carrera de ingeniería eléctrica debe llevar cursos respecto de campos muy diversos y extensos, ya no es funcional que la enseñanza se enfatice en el funcionamiento detallado de maquinaria eléctrica y/o diseño de instrumentos. La mayoría de autores está de acuerdo en que la enseñanza de la ingeniería eléctrica debe concentrarse más en los principios básicos y en las técnicas analíticas de los diferentes campos y temas. Ya que de esta manera se logra, en parte, que el profesional disponga de los conocimientos y las herramientas necesarias para desenvolverse en la sociedad cambiante en que le corresponde actuar. Debido a esto, es de vital importancia lograr que el estudiante adquiera conocimientos sólidos en aquellos cursos que tratan los principios básicos de la ingeniería eléctrica. Para esto, debe existir primero, interés genuino de parte del estudiante hacia el aprendizaje de los aspectos científicos del conocimiento que le corresponde adquirir; pues, no deja de ser cierta aquella frase que dice: *las cosas no se enseñan, sino que, se aprenden*. Sin embargo, para despertar el verdadero interés del estudiante o encauzar correctamente el ya existente, debe enseñarse de tal manera que el contenido de los distintos cursos encuentren una conexión directa con los intereses particulares mismos, para que no se vea el aprendizaje de estos temas como algo aislado o alejado de la realidad cotidiana.

Una actitud errónea, en la mayoría de veces, que el estudiante tiene hacia los cursos de formación científica, es que éstos son de muy poca importancia en la vida real, comparado con algún curso técnico. Por lo mismo, el estudiante presenta un notable poco interés en estos cursos de formación científica. Pero, de acuerdo con la nueva tendencia que ha tenido la enseñanza de la ingeniería, por los mismos avances tecnológicos y científicos de la actualidad, es de suponer que los cursos de formación científica juegan un papel de suma importancia en la formación integral de todo buen profesional de la ingeniería.

Uno de los cursos de mayor importancia en la ingeniería eléctrica y electrónica, es el Electromagnetismo, ya que éste abarca los temas de principios básicos y generales, en los que se basan todas las otras áreas de esta parte de la ingeniería. Toda la teoría de circuitos eléctricos, líneas de transmisión, máquinas eléctricas y otros, se deducen a partir de la teoría de los campos eléctricos y magnéticos. Por lo que, lograr que el estudiante se interese,

verdaderamente, en el aprendizaje de los temas correspondientes a la Teoría Electromagnética, también significa lograr que el estudiante adquiriera mejor preparación para enfrentarse a los problemas que ha de enfrentar en su desarrollo y desenvolvimiento profesional.

Una manera de hacer que el estudiante despierte interés genuino por el aprendizaje de los temas del electromagnetismo, es logrando relacionar y conectar todos estos temas con sus intereses personales. Pues, esto significa, darle a la enseñanza del electromagnetismo, un carácter más ameno y motivacional. Lo cual se logra, en cierto grado, relacionando los diferentes temas, con la realidad natural del estudiante. Muchas veces, se pierde el interés por determinado tema, debido al grado de abstracción que se necesita y a la complejidad matemática que implica la solución de los problemas, por lo que relacionando los diferentes temas con hechos y fenómenos reales, se logran incentivos para superar esta dificultad, porque el estudiante ve que estos temas tienen aplicabilidad práctica. Esto se logra diseñando experimentos referentes a los distintos temas del electromagnetismo, utilizando los avances de la ciencia y la técnica, para lograr el objetivo de interesar al estudiante o, bien, observando y analizando, sistemáticamente, hechos y fenómenos que se dan de manera espontánea en el medio natural.

Respecto de lo anterior es precisamente que trata el presente trabajo de tesis; en el que se presentan determinados análisis y experimentos, que pueden darle a la enseñanza del Electromagnetismo, ese carácter ameno y motivacional que se necesita para que el estudiante se interese verdaderamente por el aprendizaje. Por lo que los distintos aspectos que se tratan en el presente trabajo de tesis, bien pueden servir como complemento del contenido actual de los cursos de Teoría Electromagnética.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

GENERAL

Proponer elementos y aspectos que puedan darle un carácter más didáctico al electromagnetismo, de tal manera que se pueda contribuir al mejoramiento del proceso de enseñanza-aprendizaje de dicho curso.

ESPECÍFICOS

- 1.- Determinar los aspectos pedagógicos y didácticos más importantes que pueden aplicarse a la enseñanza del electromagnetismo, para darle un carácter más ameno y motivacional.
- 2.- Determinar la importancia del papel que juega la experimentación demostrativa en el proceso de enseñanza-aprendizaje de los cursos de formación científica en la ingeniería eléctrica y electrónica.
- 3.- Aplicar el método científico-experimental para la enseñanza del electromagnetismo.
- 4.- Utilizar la computadora personal como recurso de apoyo para la experimentación demostrativa.
- 5.- Adecuar y diseñar experimentos demostrativos con recursos disponibles.
- 6.- Adecuar y diseñar experimentos ilustrativos orientados a la enseñanza con grupos de personas más o menos numerosos.

PRIMERA PARTE

Generalidades

CAPÍTULO I

PEDAGOGÍA Y DIDÁCTICA GENERAL

I.1 CONCEPTO DE LA PEDAGOGÍA

La pedagogía tiene la particularidad especial de no poseer una definición concreta tanto respecto de su carácter, como respecto de su valor científico. Pero, a pesar de los distintos puntos de vista que se tienen respecto de la pedagogía, no hay en efecto más que una sola pedagogía, la que tiene por objeto el estudio de la educación. Lo que ocurre es que aún siendo la educación una realidad única esencial, inconfundible y permanente de la vida humana, está condicionada por factores diversos: situación histórica, concepciones filosóficas, visión de la vida y el mundo, progreso científico, actitudes sociales y políticas; y, de aquí, surgen las diversas interpretaciones que se dan a la pedagogía.

Es por ello, entonces, que se habla de la pedagogía como arte, como técnica, como teoría, como ciencia y como filosofía.

Pero, aunque la pedagogía puede ser un arte, una técnica, una teoría y una filosofía, esencialmente *la pedagogía es la ciencia de la educación.*

I.1.1 LOS MÉTODOS DE LA PEDAGOGÍA

Al igual que todas las otras ciencias, la pedagogía dispone de una serie de métodos para el estudio de su objeto, que es la educación. A continuación se hace referencia a estos métodos.

Observación y Experimentación. Estos son los métodos más generales utilizados por la pedagogía. La observación se refiere a la consideración o percepción de los hechos tal como se presentan espontáneamente en la realidad educativa. La observación se limita a la descripción y registro de los fenómenos sin modificarlos. La experimentación consiste en una observación provocada intencionalmente. No espera a que se produzca el fenómeno, sino que, lo produce o suscita. Tanto el experimento como la observación, no pueden realizarse a ciegas, arbitrariamente, sino que, son guiados por un propósito o una hipótesis que se quiere comprobar.

Análisis y Síntesis. El análisis se refiere a la disociación o descomposición de un todo en sus partes. Según Wundt, existen diferentes tipos de análisis: a) el análisis elemental, que consiste en descomponer un fenómeno en los fenómenos dispersos que lo componen; b) el análisis causal, que consiste en la descomposición de un fenómeno en cada una de sus partes constituyentes atendiendo a las relaciones de causa y efecto y c) el análisis lógico, cuando se examinan los hechos complejos respecto de su fundamento y consecuencia. El método sintético consiste en la inversión del análisis, es decir, en recomponer un objeto en sus partes antes separadas.

Inducción y Deducción. La inducción consiste en ir de lo particular a lo general, de los hechos a la ley. Este es el método más utilizado por la ciencia. Para que sea eficiente, debe reunirse el mayor número de casos y establecer las relaciones de semejanza entre ellos, de modo que la ley o explicación que se busque pueda tener aplicación general. La deducción es la inversión de la inducción y consiste en ir de lo general a lo particular, de la causa al efecto. La deducción no aporta ningún conocimiento nuevo, es una modificación de la inducción y apenas se emplea en la ciencia.

El método comparativo. Consiste en relacionar o parear hechos o fenómenos para encontrar sus parecidos o diferencias y obtener conclusiones pertinentes.

I.2 CONCEPTO DE LA EDUCACIÓN

Existe gran variedad de interpretaciones respecto de la educación. Por ejemplo Spranger dice: "La educación es una actividad humana que se ha realizado por sí misma desde los tiempos más primitivos aún sin una teoría manifiesta". Dewey afirma: "Lo que la nutrición y la reproducción son para la vida fisiológica, es la educación para la vida social". Petersen sostiene: "La educación es y ocurre tan originariamente como la vida y sus funciones son y se realizan. Educar pertenece, pues, al ser del hombre originaria e inseparablemente. La educación es algo dado, es una función de lo que es, de la realidad".

A pesar de que es muy difícil señalar una definición acertada de la educación, quizá la más completa sea la del pensador español Francisco Giner de los Ríos, quien la define así: "La educación es una acción universal, difusa y continua de la sociedad, dentro de la cual

la acción del educador intencional desempeña la función reflexiva, definida, discreta, propia del arte de los demás órdenes de la vida, de excitar la reacción personal de cada individuo; todo ello mantiene el educando mismo y lo que él de suyo pone para esta obra, ya lo ponga espontáneamente, ya en forma de una colaboración también intencional”.

De todo lo anterior puede decirse que la educación es una función real y necesaria de la sociedad humana mediante la cual se trata de desarrollar la vida del hombre y de introducirlo en el mundo social y cultural, apelando a su propia actividad.

I.3 CONCEPTO DE LA DIDÁCTICA

La didáctica también recibe el nombre de *metodología* y se constituye, hoy más que nunca en la rama fundamental de toda la ciencia pedagógica. La didáctica es la parte de la pedagogía que se refiere a la técnica y la metodología de la educación. Es decir, que, la didáctica es la parte de la pedagogía que *comprende todos los medios, métodos y técnicas que la educación aplica para alcanzar los fines propuestos.*

La metodología o didáctica del aprendizaje es, en consecuencia, la división más importante de la pedagogía experimental y a ella corresponde la parte explicativa por excelencia.

Tomando en cuenta que la didáctica se refiere a la metodología pedagógica, se comprende que ésta es la rama de la pedagogía experimental que se ocupa de los métodos de la enseñanza y del aprendizaje, para el logro del fin de la pedagogía, que es la educación. Sin embargo, la metodología no solamente comprende el estudio de los métodos didácticos, sino que, incluye también el estudio de los procedimientos, formas de enseñanza, relación de los métodos con los cursos de estudios, programas y material de enseñanza, así como el nuevo espíritu de los métodos en su aplicación, por lo que resulta que el nombre de metodología *no dice ni abarca todo lo que en realidad comprende.* Es por eso que se prefiere llamarle, DIDÁCTICA O DIRECCIÓN DEL APRENDIZAJE.

La nueva pedagogía – y por lo tanto la didáctica – ha comprendido, que aprender, no es retener explicaciones, ni siquiera el comprender demostraciones o repetir algo de lo mucho recibido u oído. Aprender es saber hacer. El aprendizaje real, modifica la conducta. La escuela debe preparar para la vida, pero, ésta no se enseña, sino que se aprende y, mejor aún, *se gana.* En caso de enseñar o transmitir no hay aprendizaje, pero, cuando el alumno investiga, adquiere y conquista *haciendo*, entonces sí hay aprendizaje.

En resumen, en la *didáctica o dirección del aprendizaje*, debe tenerse muy en cuenta el origen del conocimiento científico. Este se adquiere por investigación propia (heurística), que es el "arte de hallar la verdad" o se recibe ya hecho o investigado por otro (didáctica), que es el "arte de enseñar". Según lo anterior, el término "didáctica", que significa "enseñar", pareciera no responder al espíritu de la nueva educación, porque ésta no aspira a que el maestro "enseñe o transmita" sino a *que dirija el aprendizaje*. Sin embargo, no resulta ser así y se concluye que el término didáctica es -a juicio de la mayoría de autores respecto del tema- *el más adecuado*.

I.4 LA MOTIVACIÓN PEDAGÓGICA

I.4.1 CONCEPTO DE LA MOTIVACIÓN

En la vida todo se mueve al impulso de determinados intereses. Ellos son la llave principal de la existencia. La motivación pedagógica es *el aprovechamiento del interés convertido en motivo del aprendizaje. Es el interés vitalizado y puesto al servicio de la actividad escolar*.

En la actualidad, el interés tiene un valor primordial como base de la motivación. Como dice Findlay, tenemos que buscar el punto de partida, alguna fuerza impulsora del interés, que despierte todo lo posible la atención y la energía del alumno. Y como es sabido, esta verdad es aplicable a estudiantes de cualquier edad, en cualquier nivel de aprendizaje. El autor Mallart advierte, sin embargo, que la sugestión del maestro tiene muy poco valor como móvil educativo, si éste no responde al grado o tono de interés de los estudiantes. Hay que tener siempre presente que el mejor móvil de la actividad es el que está en el objeto mismo de esa actividad.

I.4.2 EL INTERÉS

El interés es la base de la motivación. Consiste en una *actitud afectiva, un estado emocional, un deseo o atracción hacia un objeto o proceso*.

En pedagogía, ese estado emocional o atracción debe despertarse en favor de las actividades correspondientes al proceso enseñanza-aprendizaje, a fin de que se fomente otra atracción o actitud más concentrada, que es la atención.

El interés necesita ser cultivado. Muchas veces los estudiantes no sienten gusto por determinadas materias o determinados temas, porque no están conectados a su interés. Por tanto, la habilidad del profesor estará en relacionar las materias, los temas y las leyes, con hechos o fenómenos físicos reales, que tengan que ver con las actividades de la vida de los alumnos.

I.5 EL APRENDIZAJE Y EL ESTUDIO

El estudio y el aprendizaje tienen una relación inseparable que los convierte en términos correlativos. Donde no hay estudio, no puede existir aprendizaje; pero el aprendizaje tampoco será real en ausencia del estudio, lo cual se debe sencillamente, a *que el ser humano estudia para aprender y aprende estudiando*. Lo anterior nos lleva a definir el alcance y concepto del estudio, tal como debe ser encarado a la luz de las nuevas corrientes pedagógicas y en vista de lo que hoy se entiende por aprendizaje.

Qué cosa es estudiar. La respuesta no es muy sencilla como parece. Muchas veces se considera que el estudiar consiste en detener la mente o la atención en un libro, con el propósito de adquirir conocimiento. Pero en realidad, el concepto del estudio es más amplio y variado. Cuando leemos un libro podemos decir que estamos estudiando, pero a veces es necesario hacer una distinción cuando se dice: no estudio, sino leo. Porque estudiar no es leer para distraerse, porque entonces no hay un propósito fijo o directriz, ni se coloca la atención de modo profundo o concentrado, sino que ella pasa ligeramente sobre el contenido de la lectura.

El estudio consiste en *la dirección de la mente o de la atención sobre un asunto con un fin o propósito determinado*. A veces, el estudio se basa en la investigación o interpretación del pensamiento contenido en la página escrita; otras en la observación; también puede basarse en la imaginación o reflexión, como cuando se efectúa algún diagrama o se resuelve algún problema matemático y, también en la adquisición de un hábito o destreza: por ejemplo, escribir en máquina.

De lo anterior, concluimos que, para el estudio son necesarios tres requisitos:

- a) la concentración o fijación de la atención;
- b) un propósito o fin determinado; y,

c) la coordinación del esfuerzo físico y mental en relación con la naturaleza del aprendizaje, para la feliz obtención del fin o propósito deseado.

Para, verdaderamente, lograr la acción educativa de enseñanza aprendizaje, deben utilizarse los *medios, métodos y técnicas adecuadas* para tal fin. En otros términos debe tenerse didáctica.

1.5.1 EL METODO

Se ha definido al método de formas diversas. Pero, ante todo, distinguir el método lógico del método pedagógico. El método lógico persigue el descubrimiento de la verdad, la obtención del saber; el método pedagógico, *la transmisión de las verdades adquiridas, la comunicación del saber*. Aquel se refiere a la investigación, éste a la enseñanza.

Limitándose al método pedagógico, al método de la educación, se debe tomar en cuenta que éste depende de la finalidad que se persiga. Sin embargo, refiriéndose a las condiciones generales del método educativo, se pueden establecer determinadas reglas metódicas, que harán que la enseñanza obtenga un carácter didáctico sistemático y certero.

Las reglas para lograr un método didáctico sistemático y certero fueron establecidas por Comenio en su *Didáctica*. A saber:

- 1.- debe enseñarse lo que hay que saber;
- 2.- lo que se enseñe debe enseñarse como cosa presente de uso determinado;
- 3.- lo que se enseñe, debe enseñarse directamente, sin rodeo alguno;
- 4.- lo que se enseñe debe enseñarse tal y como es, a saber, por sus causas;
- 5.- lo que se ofrece al conocimiento debe presentarse, primeramente, de un modo general y luego por partes;
- 6.- deben examinarse todas las partes del objeto, aún las más insignificantes, sin omitir ninguna, con expresión del orden, lugar y enlace que tienen unas con otras;
- 7.- las cosas deben enseñarse sucesivamente, en cada tiempo una sola;
- 8.- hay que detenerse en cada cosa hasta comprenderla;
- 9.- explíquense bien las diferencias de las cosas para obtener un conocimiento claro y evidente de todas.

A estas reglas anteriores, suele llamarse *reglas de oro de la didáctica*.

EL MÉTODO CIENTÍFICO EXPERIMENTAL

CONCEPTO DE CIENCIA

La definición de ciencia es un problema que, principalmente, ha ocupado la atención de los filósofos y todavía no se llega a una definición exacta.

La mayor parte de los hombres de ciencia o científicos se ocupan muy poco de temas filosóficos, como el de qué es ciencia. Ellos "hacen" la ciencia buscando nuevos conocimientos, formulando preguntas relacionadas con fenómenos naturales y encontrando respuestas; para ello se necesita intuición, además de la curiosidad. El científico, entonces, absorbe en su tarea de "hacer" ciencia, deja a un lado el análisis del concepto de ciencia y es el filósofo quien se ocupa de ello; lo que conduce a encontrar diferentes definiciones, según la corriente filosófica del autor.

La razón por la que la ciencia no se puede definir con exactitud, la da Ackoff, que no es un filósofo, en su libro *Scientific method optimizing applied research decisions*, donde dice:

"La extensa literatura que ha tratado de definir o caracterizar a la ciencia está llena de puntos de vista inconsistentes y demuestra que una definición adecuada no puede obtenerse fácilmente. Parte de la dificultad se tiene del hecho de que el significado de ciencia no es fijo, sino dinámico. La ciencia está en desarrollo, igual su significado. Toma nuevas acepciones y significados según las épocas."

Otro autor dice... que "la ciencia es el conocimiento ordenado de los fenómenos naturales y de sus relaciones mutuas".

Según esta definición, para que un conocimiento se pueda clasificar como científico debe reunir los siguientes requisitos:

- a) ser un conocimiento ordenado y sistemático,
- b) referirse a fenómenos naturales,
- c) relacionarse con fenómenos afines,
- d) legislar los fenómenos, es decir, sintetizarlos en ecuaciones matemáticas o establecer teorías que puedan explicar los fenómenos conocidos y permitan predecir situaciones futuras.

CONCEPTO DE TÉCNICA

La técnica se inicia dentro de las sociedades del hombre primitivo y es la aplicación sistemática de ciertos procedimientos bien definidos para obtener bienestar. Estos procedimientos se basan en algunos conocimientos científicos.

La ciencia y la técnica están relacionadas entre sí, y surgen en forma casi simultánea. Ya que, para que el científico pueda continuar con sus investigaciones, necesita de los objetos que fabrica el técnico; el técnico a la vez, necesita aplicar los descubrimientos del científico, para lograr mejores materiales, instrumentos más precisos o aparatos más complejos.

En la época actual, es un hecho que la ciencia está íntimamente ligada con la tecnología, que hay quienes sostienen que son indivisibles; sin embargo el científico no es un técnico; pues el científico apoyado en la técnica, investiga y logra descubrimientos con los cuales intenta explicar el mundo natural; el técnico por su parte, usa las investigaciones y descubrimientos del científico para construir nuevos objetos, máquinas y aparatos, a fin de proporcionar bienestar a la humanidad.

I.6 EL MÉTODO CIENTÍFICO

El método científico es el conjunto de reglas que señalan el procedimiento para llevar a cabo una investigación, cuyos resultados sean aceptados como válidos para la comunidad científica.

I.6.1 PRINCIPIOS Y POSTULADOS DEL MÉTODO CIENTÍFICO

Debido a que la ciencia está evolucionando continuamente, no pueden definirse postulados infalibles del método científico. Sin embargo, es posible dar los postulados más relevantes y comunes de los diferentes métodos científicos.

- *La existencia de un universo o realidad exterior: la materia o sustancia de los filósofos.*

- *La posibilidad de hacer observaciones, abstracciones y juicios. (a tales cosas se les llama procesos mentales).*

- *La validez de la lógica. (Existen raciocinios legítimos, a los cuales la ciencia debe conformarse siempre. A pesar de que existen varios tipos de lógica, siempre habrá que adoptar alguna para el caso de que se trate y se dice que la lógica gobierna todas las deducciones científicas).*

- *La existencia de uniformidad o regularidad en la naturaleza. (Se refiere a dos aspectos: el primero se relaciona con la permanencia o individualidad de algunos objetos o eventos exteriores, es decir la creencia de que el objeto que se vio hoy, será el mismo que se verá mañana (por ejemplo una mesa); el segundo se refiere a la aceptación de la validez de la inducción)*

- *La posibilidad de formular matemáticamente las leyes naturales.*

- *La necesidad de someter a prueba experimental todas las leyes, hipótesis y teorías.*

1.6.2 REGLAS DEL MÉTODO CIENTÍFICO

No pueden definirse con rigurosidad las reglas del método científico, puesto que cada trabajo científico requiere de determinado procedimiento para solucionar el problema en cuestión. Sin embargo, las enunciadas por Eigelberner son las más comunes:

- 1.- analizar el problema para determinar lo que se quiere, formando las hipótesis de trabajo para dar forma y dirección al problema que se está investigando,
- 2.- coleccionar los hechos pertinentes,
- 3.- clasificar y tabular datos para encontrar similitudes, secuencias y correlaciones,
- 4.- formular conclusiones por medio de procesos lógicos de inferencias y razonamientos,
- 5.- probar y verificar las conclusiones.

De lo anteriormente dicho respecto del Método científico, concluimos que: el Método científico es la aplicación de un conjunto de reglas que señalan el procedimiento para llevar a cabo una investigación. Y que estas reglas deben estar apoyadas en ciertos postulados.

1.7 EL MÉTODO EXPERIMENTAL

El método experimental es un método científico utilizado ampliamente en las ciencias experimentales como la Física, Química, Biología, etc.; por lo tanto, puede decirse que es un *Método científico que nos permite inducir relaciones empíricas entre variables o comprobar la veracidad de un hipótesis, ley o modelo, por medio de un experimento controlado.*

Un experimento controlado es aquel que debido a la repetibilidad del experimento se logra controlar las variables que intervienen en nuestro problema.

Al realizar un experimento intervienen factores que son los que crean las condiciones de trabajo y algunos son muy difíciles o imposibles de controlar, como por ejemplo: *las condiciones climatológicas y el factor humano*, ya que se puede estar haciendo uso de algún aparato de medición que sufra alteraciones con los cambios de humedad, temperatura o luminosidad, esto también va a repercutir en variaciones de las medidas y consecuentemente en los resultados. Además, una persona puede obtener resultados ligeramente diferentes cada vez que realiza la misma medición; esto también va a repercutir en los resultados.

1.7.1 ANÁLISIS DE LAS REGLAS DEL MÉTODO EXPERIMENTAL

Cuando se lleva a cabo una investigación, utilizando el método experimental, debe seguirse las siete reglas.

1.- *Delimitar y definir el objeto de la investigación o problema.* Determinar claramente los objetivos del experimento, debe ser el paso inicial. Ya que a partir de esto se pueden definir las variables independientes, variables dependientes, los parámetros constantes y la precisión necesaria en la medición de las variables. Además, se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- a) la bibliografía existente,
- b) alcance del experimento,
- c) el equipo disponible y su precisión,
- d) el tiempo y dinero disponibles.

2.- *Plantear una hipótesis de trabajo.* Para cubrir esta regla del Método experimental se debe tener seguridad del trabajo que se va a realizar:

- a) si se trata de verificar una hipótesis, una ley o un modelo, no es necesario plantear una hipótesis de trabajo,
- b) si el trabajo es complemento o extensión de otro, es posible usar la hipótesis del trabajo original o con alguna pequeña modificación,
- c) si el problema por investigar es nuevo, entonces, sí será necesario plantear una hipótesis de trabajo.

3.- **Elaborar un diseño experimental.** Esto se hace mediante los siguientes pasos:

- a) determinar todos y cada uno de los componentes del equipo,
- b) acoplar los componentes,
- c) realizar un experimento de prueba,
- d) interpretar tentativamente los resultados y comprobar la precisión, modificando, si es necesario, el procedimiento y/o el equipo utilizado.

4.- **Realizar el experimento.**

5.- **Analizar resultados.** El análisis o interpretación de resultados, ya sean valores, gráficas, tabulaciones, etc., debe contestar lo más claramente posible las preguntas planteadas por el problema.

6.- **Obtener conclusiones.**

7.- **Elaborar un informe por escrito.** El principal requisito para elaborar un informe escrito, es la claridad y debe hacerse en cuatro partes o secciones que son las siguientes:

- a) definición del problema,
- b) procedimiento experimental,
- c) resultados,
- d) conclusiones.

De lo anterior, se puede decir que *el propósito del método experimental es el de resolver algún problema o duda por medio de un experimento* y para llevar a cabo de manera correcta el experimento deseado, se siguen las siete reglas citadas anteriormente del método experimental.

Se puede concluir, entonces, que a partir de un problema se formula una hipótesis, que por medio de inferencias inductivas, se llega a una predicción. Para confirmar esta predicción se planea un experimento que necesitará de instrumentos y técnicas de medición. La realización del experimento producirá resultados que interpretados con técnicas de análisis de datos, se puede escribir en el reporte escrito o considerar la verificación de la hipótesis si estos resultados no son satisfactorios.

Lo dicho anteriormente se muestra en forma gráfica en la siguiente ilustración:

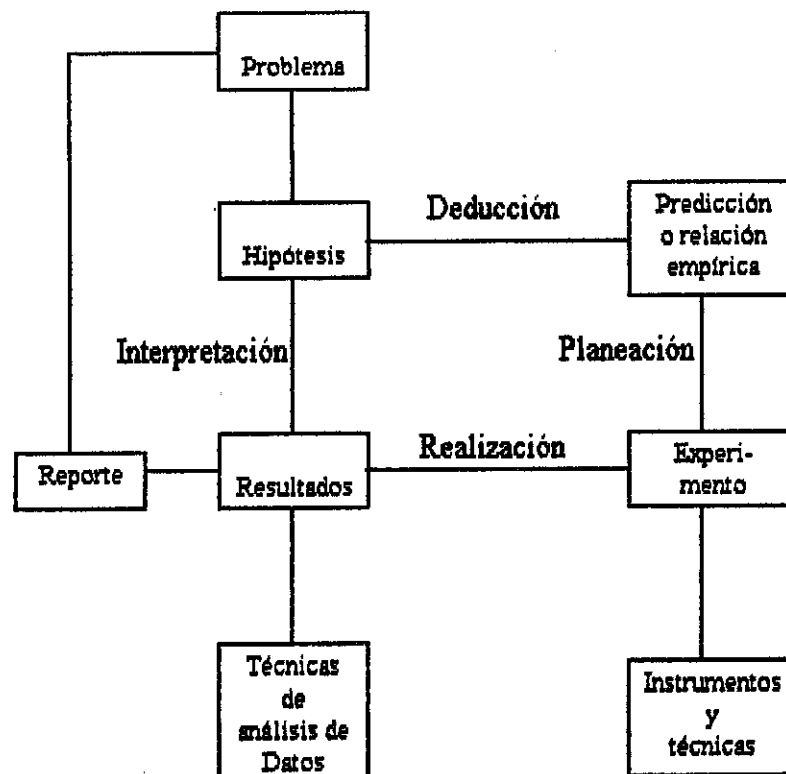


Figura No. I-1. Diagrama esquemático de las reglas del Método Experimental

LA EXPERIMENTACIÓN DEMOSTRATIVA

I.8 LA EXPERIMENTACIÓN DEMOSTRATIVA COMO UN MÉTODO DE ENSEÑANZA

Introducción. La experimentación demostrativa puede ser una excelente herramienta para la enseñanza, cuando no se tiene la oportunidad de realizar laboratorios individualizados, porque no se cuenta con el equipo y las instalaciones necesarias. En muchos casos, se logra un mejor desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje con la utilización de experimentos demostrativos, que con lecciones de laboratorios de experimentación individualizados.

I.8.1 EN QUE CONSISTE UNA DEMOSTRACIÓN

La actividad de demostración puede ser utilizada para gran variedad de actividades de la enseñanza, por ejemplo: en la enseñanza del estudio de la tierra cuando se explica la diferencia entre una roca volcánica y una roca sedimentaria dando a conocer muestras de cada una de ellas; en la enseñanza de la Biología al probar o mostrar la formación de carbohidratos cuando ocurre la fotosíntesis; en la enseñanza de la astronomía, cuando se usa una lámpara (el sol) una pelota (la luna) y la cabeza del profesor (la tierra) para mostrar un eclipse solar o bien las fases de la luna. En la enseñanza del electromagnetismo, donde la orientación de los temas va hacia la electrostática, las leyes que gobiernan el electromagnetismo, materiales magnéticos, etc., todo lo cual puede demostrarse.

En una experimentación demostrativa, debe enfatizarse en la utilización de equipo no complicado con que pueden obtenerse resultados que pueden ser utilizados para la ilustración de determinados conceptos.

I.8.2 VENTAJAS DE LA EXPERIMENTACIÓN DEMOSTRATIVA

A pesar de que para una demostración se requiere menor tiempo para la enseñanza, que en un experimento individualizado, sí se requiere mayor preparación que en el caso de una clase expositiva o una lectura dirigida. Si se utiliza correctamente un experimento demostrativo, se puede:

- hacer que la clase sea más animada e interesante,
- estimular la motivación del estudiante por aprender,
- relacionar la teoría con la práctica de una manera estructurada y controlada,
- estimular la retención de lo que se aprende, ya que una demostración es más fácil de recordarse que una clase expositiva.

Un experimento es usado para evaluar una teoría, ya que cualquier ley puede ser probada por medio de experimentos. De esta manera, el profesor puede mostrar que las leyes, fórmulas, etc., no simplemente existen en los libros, sino que están relacionados con el ambiente natural.

Muchos experimentos pueden ser realizados con equipo sencillo disponible, esto bien puede representar una ventaja, porque cuando el estudiante está familiarizado con las características del equipo y el material, puede repetir por cuenta propia determinado experimento.

Tanto la experimentación demostrativa, como la experimentación individualizada, tienen sus ventajas y desventajas. Las ventajas más importantes de la demostración en relación a los laboratorios de experimentos individuales son:

- 1.- **costo:** solo se requiere un juego de equipo y/o materiales,
- 2.- **tiempo:** la demostración requiere menor preparación y tiempo de desarrollo,
- 3.- **control sobre el proceso de aprendizaje:** regularmente la demostración es más sistemática y más ordenada que un experimento individualizado, el profesor tiene más control sobre las dudas e inquietudes de los estudiantes,
- 4.- **integración con la teoría:** se logra mejor una relación de la teoría con una demostración que con un experimento individualizado,
- 5.- **facilidad:** usualmente no se requieren salones especiales,
- 6.- **involucración:** los estudiantes se involucran más durante el desarrollo del experimento,
- 7.- **ejercitación de habilidades:** si las instrucciones están bien orientadas, se obliga al estudiante a pensar a cerca del experimento y su diseño, además de la demostración en sí.

1.8.3 OBJETIVOS DE UNA DEMOSTRACIÓN

1.- Mostrar que la ciencia es experimental: los experimentos representan la clave para la validez del conocimiento científico.

2.- Ejercitar la destreza del estudiante en el pensamiento científico (observación, razonamiento, formulación de conclusiones, explicación de resultados, reconocimiento de errores en un experimento).

3.- Facilitar el aprendizaje y la retención.

1.8.4 LA METODOLOGIA DE LA DEMOSTRACIÓN

Muchas veces un experimento demostrativo no es efectivo debido al método utilizado. Ya que el profesor no tiene el cuidado de involucrar a todos, en lo que se está llevando a cabo; no se discute la explicación de los resultados obtenidos para forzar así a los estudiantes a razonar a cerca de su propia explicación. Muchos profesores tienden a divulgar los resultados de la demostración *antes* de ejecutarla, esto hace que se pierda el interés.

Los siguientes pasos pueden ayudar a mejorar la efectividad de una demostración:

1.- El profesor sólo debe plantear el problema que se espera resolver con el experimento y no los resultados esperados porque esto hace que se pierda interés y la esencia del experimento es, que, es una clave para la comprobación del conocimiento científico.

2.- El profesor debe explicar, brevemente, el equipo utilizado. Al ponerle mucho énfasis a detalles irrelevantes del equipo, se desvia de la idea central. Un diagrama o esquema en la pizarra, es mejor que mil palabras.

3.- A través del intercambio de preguntas y respuestas con los estudiantes, el profesor logra enfatizar en el problema central relacionado con el experimento y los estudiantes podrán comprender mejor el conocimiento obtenido de la demostración.

4.- La ejecución del experimento podría ser con la ayuda de uno o más estudiantes. Luego, el profesor cuestiona a estos estudiantes acerca de lo que observaron. Regularmente, los estudiantes se fijan en hechos irrelevantes. Las preguntas del profesor puede orientar a los estudiantes a fijar la atención en los conceptos relevantes.

5.- Para estimular la integración de todos los estudiantes, cada estudiante debe formular sus propias observaciones.

6.- Una discusión acerca de los resultados del experimento ayudará llegar a la conclusión correcta para, luego, discutir las conclusiones con todos los estudiantes.

7.- Después de las discusiones, el profesor debe formular la explicación o conclusión final del resultado en la pizarra.

Debe tomarse en cuenta que la demostración puede orientar a nuevas cuestiones, que posiblemente habrá que contestarlas con algún experimento rápido y sencillo, que podría ser utilizado como una oportunidad de mostrar la naturaleza experimental de la ciencia.

Discusión durante la demostración.

La clave del éxito en una demostración, es la *interacción* entre el profesor y los estudiantes. Cuando sólo se mira y se oye, el estudiante no aprende mucho o puede fijar su atención en aprender cosas equivocadas. Además, si no existe retroalimentación, no habrá manera de detectar los conceptos erróneos que tiene el estudiante. Se debe orientar correctamente la atención del estudiante durante el experimento por medio de preguntas consistentes. A veces es necesario interrumpir el desarrollo del experimento para aclarar alguna duda o inquietud. La preparación y asignación de las preguntas, es la parte más importante de la preparación para la enseñanza por medio de experimentos demostrativos. Cuando se tiene el cuidado de preparar correctamente el experimento, se logrará que el estudiante se sienta motivado por aprender, porque se dará cuenta que todo el planteamiento formal de las leyes de la ciencia tienen relación y aplicación en su ambiente natural.

SEGUNDA PARTE

*La Didáctica del
Electromagnetismo*

PROLEGÓMENOS

Los aspectos que se mencionaron en el capítulo anterior, son los más relevantes en cuanto a la enseñanza en general, en cualquier área del conocimiento humano.

En cuanto a la experimentación demostrativa, ésta se adapta a la enseñanza de cualquier tema relacionado con cualquier materia que pertenezca a cualquier rama de la física, siempre que se logre diseñar un experimento para el tema deseado.

El electromagnetismo es una de las ramas principales de la Física, por lo que es posible adecuar determinados experimentos para la enseñanza de los temas correspondientes a la introducción al electromagnetismo, que es lo que se imparte en el curso de Teoría Electromagnética 1. Además, tomar en cuenta los aspectos más relevantes de la pedagogía y la didáctica en general para la enseñanza de los temas correspondientes al electromagnetismo, puede significar un avance grande en cuanto al desarrollo del proceso enseñanza-aprendizaje, lo cual significa una mejor comprensión de los teoremas, las ecuaciones y las leyes que gobiernan la Teoría Electromagnética.

La parte que sigue del presente trabajo de tesis se refiere a los distintos temas que se tratan en el curso de Teoría Electromagnética, de la Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica, de la Facultad de Ingeniería, USAC, para los cuales se sugiere una enseñanza por medio de diferentes experimentos demostrativos, aprovechando los avances de la ciencia y la técnica y, también, utilizando recursos sencillos y disponibles, con el fin de darle a la enseñanza del Electromagnetismo un carácter más ameno y motivacional.

El hecho de utilizar experimentos demostrativos, toma en cuenta la carencia de suficientes recursos y de la necesidad de adaptación a grupos de estudiantes relativamente grandes.

CAPÍTULO II

CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

II.1 LÍNEAS DE CAMPO Y SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

II.1.1 DEFINICIONES TEÓRICAS

Por medio del experimento que Charles Coulomb realizó, se llegó a determinar, cuantitativamente, que dos objetos que tienen una carga estática de electricidad experimentan una determinada fuerza entre sí.

La ley experimental de Coulomb afirma que, *la fuerza entre dos objetos muy pequeños en el vacío o en el espacio libre, separados una distancia relativamente grande en comparación con el tamaño de los objetos, es directamente proporcional a la carga de cada uno de ellos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación.*

$$F = k Q_1 Q_2 / r^2$$

Si se considera una carga en posición fija y se mueve lentamente una segunda carga a su alrededor, se puede notar que en todas partes, esta segunda carga experimenta una fuerza. Se sabe que existen, en general, dos tipos de fuerzas: a) fuerzas de contacto y, b) fuerzas de acción a distancia o fuerzas de campo. Para el primer tipo de fuerza, es necesario que los objetos estén en contacto directo para experimentar determinada fuerza; en cambio, en el segundo tipo, cualquier par de objetos que se consideran, experimentan una fuerza aún cuando no estén en contacto directo. El tipo de fuerza que experimenta la carga en mención, pertenece a este último.

Puede decirse, entonces, que la segunda carga que se mencionó anteriormente, está inmersa dentro de algún *campo* de fuerza. A esta carga, regularmente, se le llama *carga de prueba*. Se puede determinar que la fuerza que experimenta esta carga de prueba varía en magnitud y dirección, dependiendo de la posición que tenga respecto de la carga fija. Además, la magnitud y dirección de la fuerza, depende también de la forma y tamaño de la carga fija. La carga de prueba, se toma como positiva por definición y su tamaño debe ser lo más pequeña posible, de tal manera, que, no se altere el campo de fuerza producido por la carga fija.

Si se toma ésta fuerza como una fuerza por unidad de carga, se obtiene

$$F/Q_0 = k Q_1/r^2$$

que es una expresión a la que se le llama *intensidad de campo eléctrico*. Por lo tanto, la intensidad de campo eléctrico se define como *el vector fuerza sobre cada unidad de carga positiva de prueba*.

La dirección de la fuerza que experimenta la carga de prueba, será exactamente la misma dirección que debe tener el campo eléctrico.

Para representar, esquemáticamente, el campo eléctrico, se utilizan líneas, que son llamadas comúnmente *líneas de campo*, aunque también se utilizan otros términos, como por ejemplo: líneas de flujo y líneas de dirección.

Estas líneas, realmente, no existen. Sólo se trata de un artificio para ilustrar la existencia de un campo eléctrico, de tal manera que pueda formarse una idea de cómo es el campo en la región que rodea una determinada carga o distribución de carga. Si la carga fija es positiva, las líneas de campo divergen de la misma, ilustrando la dirección y sentido de la intensidad de campo eléctrico, ya que ésta es la dirección de la fuerza que experimenta la carga de prueba positiva (en este caso, las puntas de flecha apuntan hacia afuera de la carga). Si la carga fija es negativa, las líneas de campo convergen en la misma, ya que en esta dirección actúa la fuerza sobre la carga de prueba y, por lo tanto, también será la dirección de la intensidad de campo eléctrico (las puntas de flecha apuntan hacia la carga).

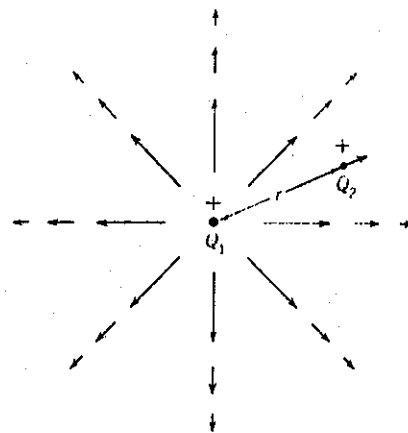


Figura No.II.1 Ilustración de los vectores que indican la magnitud y la dirección del campo eléctrico asociado a una carga puntual Q_1 positiva. (En este caso, las puntas de flecha apuntan hacia afuera de la carga)

Una sola línea no puede proporcionar ninguna idea de la intensidad que tiene el campo eléctrico, sólo ilustra la dirección. Pero si se trazan varias líneas, se puede tomar que en las regiones donde las líneas están separadas por un espacio menor, serán las regiones donde el campo eléctrico es más intenso.

Debido a que estas líneas sólo son imaginarias, basta con trazar una primera línea y a partir de ésta se trazan todas las demás.

El potencial eléctrico escalar. Si la carga de prueba se mueve dentro de la región afectada por el campo eléctrico de la carga que se considera fija, debe realizarse un trabajo sobre ella. Ya que por la definición de trabajo mecánico, $W = F \cdot d$, se tiene que toda vez existe una fuerza sobre un objeto, es necesario realizar un trabajo sobre él para moverlo de un lugar a otro. Y la cantidad de trabajo requerida es igual al producto escalar o producto punto del vector fuerza por el vector desplazamiento.

En éste caso, la fuerza es de naturaleza eléctrica. Y por la definición de trabajo se concluye que sólo se realiza trabajo sobre la carga de prueba cuando se mueve en una dirección paralela al vector fuerza eléctrica y, por lo tanto, al vector intensidad de campo eléctrico, el cual puede tener un valor positivo o negativo porque el trabajo es una forma de energía, que es un escalar.

Si la carga se mueve en la dirección que es contraria al campo eléctrico, el agente externo que mueve la carga debe realizar un trabajo positivo sobre dicha carga. Si la carga se mueve en la misma dirección del campo eléctrico, el agente externo que mueve la carga de prueba, debe realizar un trabajo negativo o, dicho de otro modo, no necesita realizar trabajo alguno sobre la carga, el campo eléctrico es el que lo hace.

Cuando la carga de prueba se mueve en una dirección perpendicular al vector intensidad de campo eléctrico, no se realiza trabajo alguno sobre ella (por la misma definición de trabajo).

El trabajo por unidad de carga que se necesita para mover la carga de prueba de una posición a otra, se denomina la **diferencia de potencial eléctrico** entre el par de puntos que se considera. La definición matemática de la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera, es la siguiente:

$$V = - \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

Donde la integración se realiza sobre una trayectoria que une a los dos puntos en cuestión. De la ecuación anterior, se ve claramente que la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, no depende de la trayectoria seguida para ir de uno punto al otro.

Por otro lado, debido a la existencia de un campo en la región que rodea a cualquier carga, la carga de prueba poseerá una energía debido a su posición respecto de la carga fija. Esta energía es la energía potencial o simplemente, potencial eléctrico, que se considera como **la diferencia de potencial entre el punto en cuestión y un punto con potencial cero**. Un punto con un nivel de potencial eléctrico cero, significa que no debe ser afectado de ninguna manera por el campo eléctrico de la carga o distribución de carga fija. Este punto de referencia dependerá de la circunstancia específica de que se trate. Si se trata de un problema experimental, regularmente se toma la tierra como referencia para este nivel de potencial cero; en tanto que si se trata de un problema teórico, se acostumbra tomar, como referencia de potencial cero, un punto a una distancia infinita de la carga fija, porque este punto ya no es afectado por el campo eléctrico de la carga fija. La definición matemática del potencial eléctrico es la siguiente:

$$V = Q/4\pi\epsilon r$$

Donde Q es la carga fija y r la distancia entre ésta y el punto donde se quiere conocer el potencial.

Como se mencionó anteriormente, existe determinada dirección en que se mueve la carga de prueba sin que se realice trabajo alguno sobre ella. Al mover la carga en esta dirección, no existirá ninguna diferencia de potencial entre cualquier par de puntos, inicial y final, porque no se realiza trabajo sobre ella. A las regiones en las que es posible mover la carga de prueba sin necesidad de realizarse trabajo ni positivo ni negativo sobre ella, se les llama *superficies equipotenciales*.

Relación entre las líneas de campo eléctrico y los contornos equipotenciales. Por el mismo hecho de que la dirección en que se puede mover la carga de prueba sin que sea necesario realizar trabajo sobre ella, es perpendicular a la dirección del vector fuerza, se concluye que las superficies equipotenciales deben ser en todo punto **perpendiculares** a las líneas de campo eléctrico, sin importar la complejidad que pueda tener la forma del campo eléctrico. En la siguiente figura se muestra el caso de una carga puntual.

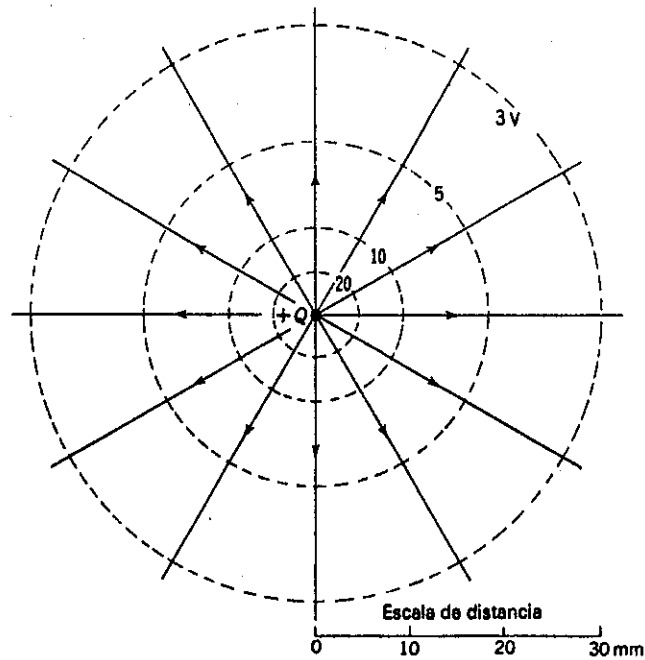


Figura No.II.2 Relación entre líneas de campo (continuas) y superficies equipotenciales (de trazos), alrededor de una carga puntual.

En la figura que se muestra a continuación se ilustra la relación existente entre las líneas de campo eléctrico y las superficies equipotenciales para dos cargas puntuales de igual signo.

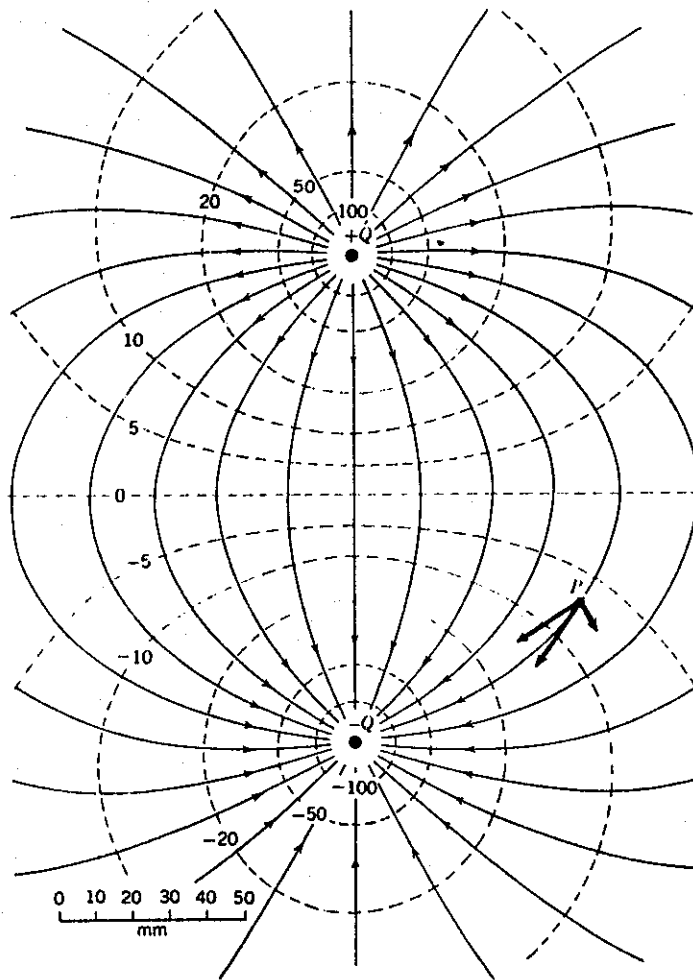


Figura No.II.3 Relación entre líneas de campo y superficies equipotenciales para dos cargas puntuales de igual signo.

Las líneas de campo eléctrico se constituyen también las líneas de flujo eléctrico que sugieren la existencia de "algo" que está perturbando al medio que rodea a cualquier carga.

II.2 SIMULACIÓN POR COMPUTADORA DE DISTRIBUCIONES DE CARGA PARA LA VISUALIZACIÓN DE LÍNEAS DE CAMPO Y SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

Con una explicación eminentemente teórica o con el auxilio de libros de texto solamente, probablemente no se logra dejar completamente claro los conceptos de líneas de campo y de superficies equipotenciales. Pero, si se utiliza una computadora para la enseñanza de estos temas, es posible simular cargas puntuales o distribuciones de carga esférica, para la visualización, tanto de las líneas de campo eléctrico como de las superficies equipotenciales. La utilización de este simulador de cargas permitirá que el estudiante de Teoría Electromagnética, pueda comprender la forma en que el medio que rodea a una carga se ve afectado por el campo eléctrico de ésta, la forma de las líneas de campo cuando se tienen cargas de igual signo y cargas de diferente signo. Además, podrá comprender que las líneas de campo sólo son un artificio para tener una idea de cómo el medio circundante se ve afectado por la presencia de una o varias cargas, por el hecho de tener la opción de variar, tanto la densidad de estas líneas como la posición que ocupan en el espacio (rotarlas).

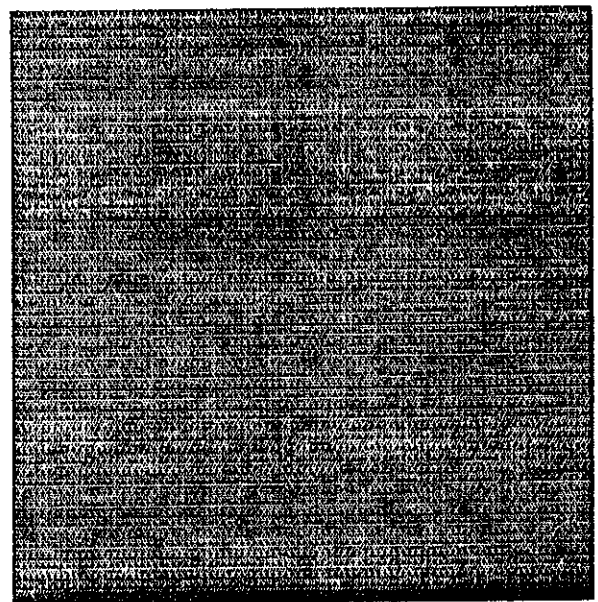
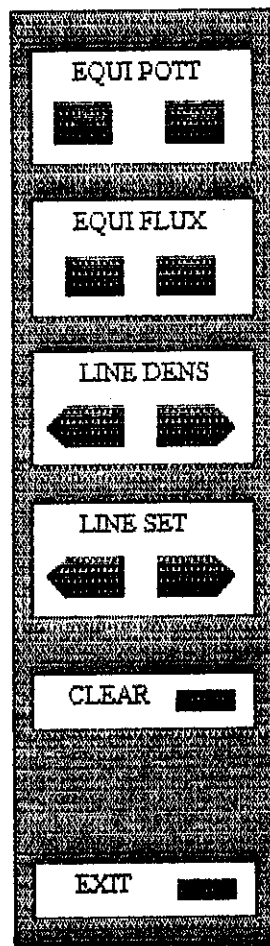
Las características que tiene éste programa de simulación, para que se pueda cumplir con el objetivo de darle un carácter didáctico a la enseñanza de este tema, son:

- 1.- posibilidad de simular cargas positivas y negativas,
- 2.- posibilidad de simular varias cargas a la vez, para lograr una visualización de cómo y en qué se afecta el campo eléctrico de alguna carga o distribución de carga cercana,
- 3.- posibilidad de aumentar o disminuir la densidad de carga, con el fin de visualizar la variación de la intensidad del campo eléctrico al rededor de una distribución de carga, cuando a ésta se le varía la densidad.
- 4.- posibilidad de rotar las líneas de campo eléctrico, para ilustrar que las líneas de campo son sólo imaginarias y, por lo mismo, pueden cambiar de posición en el espacio,
- 5.- posibilidad de variar la densidad de las líneas (aumentar o disminuir la cantidad de líneas) tanto de campo eléctrico, como de potencial eléctrico, para una mejor visualización de dichas líneas.

El programa que se sugiere para la ilustración de este tema, se llama FIELD VISION, que es un programa muy fácil de utilizar. Además, sólo necesita ocupar 332,070 bytes de memoria de disco.

De los archivos del programa, se cuenta con dos que son ejecutables, los cuales son: FLDVIS_E, y FLDVIS_V, dependiendo de si el monitor con que se cuenta es EGA o VGA, respectivamente, para un mejor aprovechamiento de las características del programa. El nombre del programa ejecutable FLDVIS, es ilustrativo para el nombre: FIELD VISION.

Al activar el programa ejecutable, aparecerá en la pantalla el menú que se muestra en la siguiente figura:

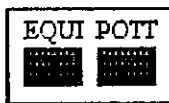


FIELD VISION

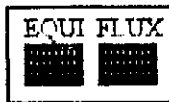
Figura No.II.4 Menú que aparece en pantalla cuando se activa el programa

FIELD VISION

El manejo del simulador es posible únicamente por medio del mouse. Los comandos del menú que aparecen en la pantalla sirven para lo que a continuación se describe.

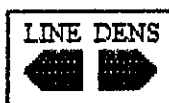


Sirve para visualizar las líneas equipotenciales de una carga positiva o negativa, dependiendo de si se activa el signo más (+) o el signo menos (-) respectivamente.



Sirve para visualizar las líneas de campo eléctrico de una carga positiva o negativa, dependiendo, de cuál signo se active. El signo más (+) corresponde a una carga positiva y el signo menos (-) corresponde a una carga negativa.

Tanto para las superficies equipotenciales, como para las líneas de campo eléctrico, la carga se simula al hacer un clic con el mouse en el botón izquierdo, en el cuadro del lado derecho (en la posición que al usuario le convenga) después de activar el correspondiente signo ya sea de EQUI POT o de EQUI FLUX, dependiendo si quiere ver superficies equipotenciales o líneas de campo, respectivamente. Cuanto más tiempo se mantenga pulsado el botón del mouse, mayor será la densidad de carga que se obtiene. Para simular otra carga o cambiar de opción, se presiona la tecla ESC o, bien, pulsando el botón derecho del mouse.



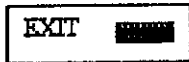
Sirve para variar la densidad de las líneas, (cantidad de líneas) ya sea de campo eléctrico o de superficies equipotenciales, dependiendo de qué es lo que se tenga en la pantalla en ese momento. La flecha que apunta hacia la izquierda disminuye la cantidad de líneas y la flecha que apunta hacia la derecha, las aumenta.



Se utiliza para rotar o cambiar de posición en el espacio, ya sea de las líneas de campo eléctrico o de superficies equipotenciales, dependiendo de lo que se tenga en pantalla en ese momento. La flecha que apunta hacia la izquierda mueve las líneas en dirección contraria a la que siguen las manecillas del reloj y la flecha que apunta hacia la derecha, mueve las líneas en la misma dirección que siguen las manecillas del reloj.



Se utiliza para limpiar la pantalla cuando el usuario así lo desee.



Finaliza el trabajo en FIEL VISION, y saca del programa al usuario.

Una de las ventajas con que cuenta el programa, es que se pueden visualizar, tanto las líneas de campo como las superficies equipotenciales de cualquier combinación de cargas: una carga única (de cualquier signo) dos cargas de igual signo, dos cargas de diferente signo, etc., por lo que puede observarse el campo eléctrico de algún dipolo, cuadripolo, etc.

Las desventajas que presenta este simulador de cargas, son:

- 1.- no se pueden sobreponer las líneas de campo eléctrico a las superficies equipotenciales, por lo que no se puede observar la relación existente entre líneas de campo y superficies equipotenciales,
- 2.- las líneas de campo eléctrico no tienen puntas de flecha para visualizar si las líneas de campo divergen de la carga o convergen en ella.

II.3 MEDIDAS DE CAMPOS ELECTRICOS ESTÁTICOS CON EL FET

La manera en que comúnmente se miden campos eléctricos estáticos y cargas eléctricas estáticas, es con la utilización de un electroscopio. Pero este aparato de medición es muy poco confiable, por el simple hecho de que es muy frágil y cuando se utiliza, muchas de las veces, es más sensible al polvo y a la humedad, que a cargas eléctricas. Una alternativa con que se puede contar actualmente, es con la utilización del FET (Field Effect Transistor o *Transistor de Efecto de Campo*).

Marco Teórico. El transistor de efecto de campo (FET: *field effect transistor*) es un dispositivo unipolar de tres terminales que contiene una unión PN básica y puede construirse como un FET de unión (JFET: *Junction FET*) o como un FET metal óxido semiconductor (MOSFET). La estructura física de un JFET se muestra en la siguiente figura.

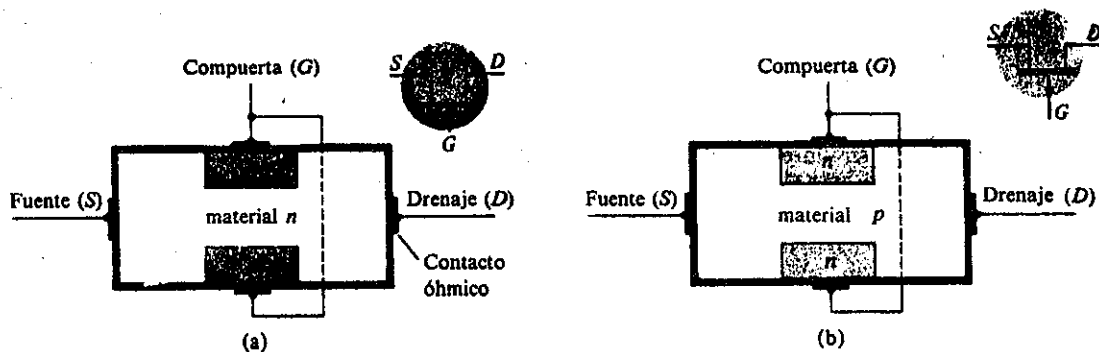


Figura No.II.5 a) Estructura física y simbología circuital del JFET de canal N.

b) Estructura física y simbología circuital del JFET de canal P.

El JFET puede ser de canal N o de canal P. Indistintamente de qué tipo se trate, las designaciones de las tres terminales que posee son: *compuerta (gate)*, *drenaje (drain)* y *fuelle (source)*.

El JFET de canal N se construye empleando una barra de material tipo N, dentro del cual se difunde un par de regiones tipo P. Un JFET de canal P, se elabora empleando una barra de material tipo P, con regiones difundidas tipo N.

El uso de la tecnología metal-óxido-semiconductor (MOS) para la construcción de transistores de efecto de campo (FET) también emplea una pequeña barra de material tipo P. Dos regiones de material tipo N, son difundidas en una de las caras del material tipo P, para formar las terminales de *drenaje (drain)* y *fuelle (source)*. Una capa muy delgada de aislante de dióxido de silicio es formada sobre estas dos terminales y una capa conductora también es agregada por evaporación de aluminio sobre el dióxido de silicio. La capa de aluminio es la que se constituye como la *compuerta (gate)* que permite “encender” y “apagar” el flujo de electrones de la fuente al drenaje.

Si se toma en cuenta el comportamiento que tienen los materiales semiconductores extrínsecos, se tendrá que la carga no puede fluir del material tipo N al material tipo P, sino que en la unión de estos dos materiales se formará un “potencial de barrera”. Entonces, en este dispositivo no fluirá la carga de la fuente al drenaje, porque ambos están separados por una parte de la barra que es de tipo P.

Sin embargo, podrá ocurrir un flujo de carga *si una cantidad de carga extra en la compuerta crea un canal tipo N a través de la barra tipo P*. De esta manera se formará un canal que unirá la compuerta y la fuente, como puede apreciarse en la siguiente figura.

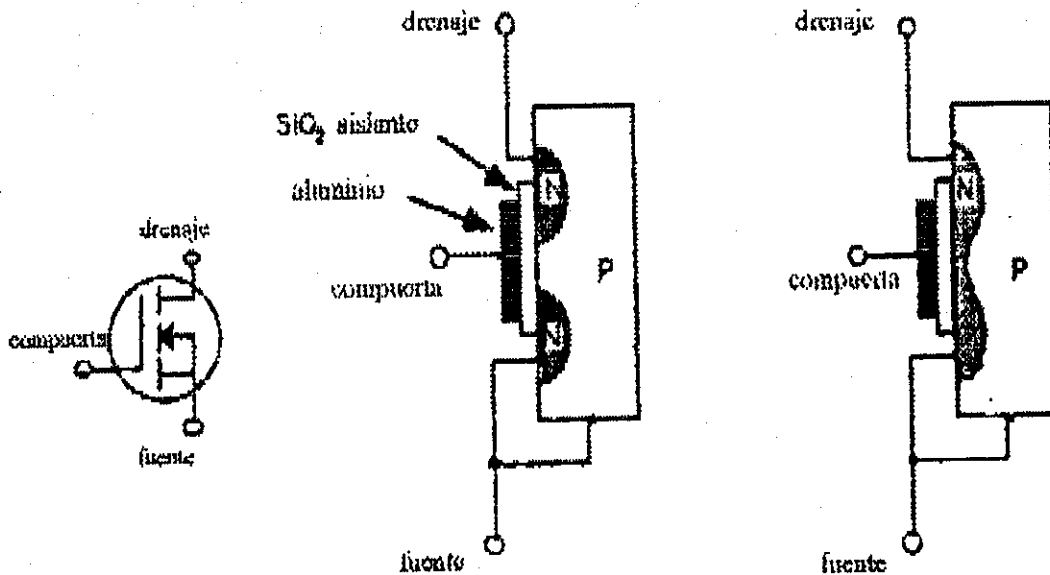


Figura No. II.6 Simbología circuital, estado de no conducción y estado de conducción del MOSFET con material de base tipo P.

Esto es exactamente lo que sucede cuando se aplica una carga extra suficiente al terminal denominado compuerta, de tal manera que proporcione una *alta* presión eléctrica.

El interés particular sobre este dispositivo para la medición de campos eléctricos estáticos; es que a diferencia del transistor de unión bipolar (BJT: *Bipolar Junction Transistor*) que es controlado por corriente; el FET es un dispositivo *controlado por voltaje*. En otros términos, es un dispositivo sensible a la presencia de algún campo eléctrico estático.

Diseño y ejecución. El FET que se recomienda usar, es el VMOS poder FET, por las características que éste presenta.

La manera en que funciona este dispositivo, es como se describe a continuación: debido a que la "compuerta" del FET está aislado del cuerpo del transistor por una placa de silicio oxigenado, se forma una especie de condensador con el material P. Por lo tanto, cuando se tiene la presencia de carga positiva en la compuerta, se crea un campo eléctrico en el condensador. De esta manera, los agujeros (hoyos o huecos electrónicos) en el material P son expulsados y los electrones son atraídos. Así se crea una banda estrecha de material tipo N. En estas condiciones el FET se cierra, es decir, se tiene la condición de **conducción**. Entre la "compuerta" y la "fuente" hay integrado un diodo del tipo Zener. Este diodo Zener protege

al transistor contra campos demasiado intensos. Por ésta razón éste tipo de FET es muy robusto y muy útil para los estudiantes. En la figura siguiente se muestra el aspecto físico del dispositivo en mención.

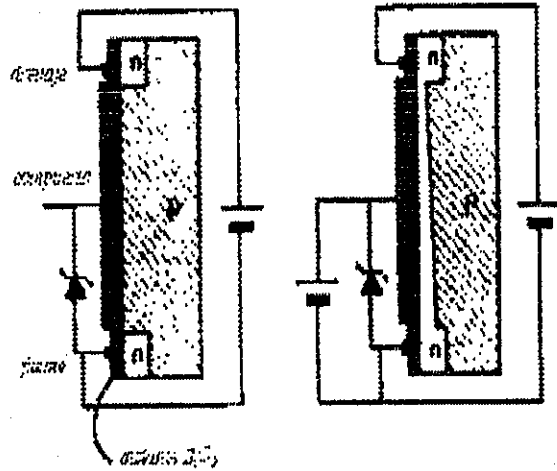


Figura No. II.7 Aspecto físico del dispositivo utilizado en el experimento.

En la figura siguiente se muestra el esquema del medidor de campo eléctrico. El FET utilizado es el VN10KM.

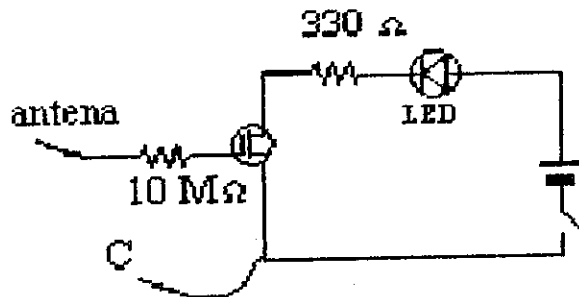


Figura No. II.8 Esquema del circuito utilizado para la medición de campos eléctricos estáticos con el MOSFET.

El cordón libre "C" se tiene para que pueda cortocircuitarse la fuente y la compuerta del FET y de esta manera el FET vuelve a su neutralidad.

La antena es una resistencia que se conecta directamente a la compuerta. De este modo, el FET queda influenciado por la corriente de la fuente utilizada y si la compuerta se pone positiva, el LED "enciende".

Detección de carga positiva. Si la antena se mueve hacia algún objeto cargado positivamente, se verá que el LED enciende. Si se aleja la antena del objeto con carga positiva, el LED deja de alumbrar.

El campo eléctrico alrededor del objeto con carga positiva, induce cargas positivas en la compuerta y debido al comportamiento de capacitor que se tiene, se formará un canal tipo N entre drenaje y fuente, y, el FET se "cierra" dejando circular corriente por el circuito. Si la antena se separa del objeto cargado, las cargas desaparecen y el FET se "abre" cortando la corriente del circuito. Debido a que se puede disponer de un alambre (antena) de la longitud deseada, este aparato sencillo es útil para la detección de la existencia local de cargas en cualquier material u objeto.

Detección de cargas negativas. Muchos tipos de plásticos se cargan con carga negativa cuando éstos son frotados con lana. Si a este plástico se le acerca la antena de nuestro dispositivo, no pasa nada. Si se aleja la antena, se verá que el LED enciende. La explicación a esto, es que si el plástico cargado negativamente, se acerca a la antena, se induce una carga negativa en la compuerta. En este caso, el diodo integrado funciona como un canal de desagüe para dicha carga negativa. Si la antena se aleja, se tendrá carga positiva excedente en la compuerta, lo cual hará que de nuevo se forme el canal tipo N entre drenaje y fuente y el FET se "cierra", permitiendo que por el circuito empiece a circular corriente. Ahora se tiene la posibilidad de desconectar el LED, acercando la antena al plástico cargado negativamente.

II.4 MÉTODOS EXPERIMENTALES

El tema de los métodos experimentales de mapeo, es de una importancia grande para la enseñanza del electromagnetismo, porque es posible lograr que un determinado método experimental de mapeo llegue a ser muy útil para la comprensión de los temas relacionados con el campo eléctrico y las superficies equipotenciales, ya que muchas veces, la complejidad matemática que necesita la solución de determinado problema relacionado con campos

eléctricos y superficies equipotenciales hace que se pierda la visión original que debe tenerse para la comprensión del tema y lo que sucede es que la atención se enfoca, de manera equivocada, en los detalles del desarrollo matemático de la solución del problema en cuestión.

La importancia de disponer de métodos para la determinación de superficies equipotenciales es grande, debido a que en la mayoría de los problemas prácticos no se tiene conocimiento acerca del campo eléctrico o de la distribución de carga de que se trata, sino que, tanto el campo eléctrico como la distribución de carga correspondiente, son lo que hay que llegar a determinar y lo único de que se dispone son datos acerca de la diferencia de potencial existente entre dos puntos cualesquiera. Y es a partir de este dato de la diferencia del potencial eléctrico, que es posible determinar la intensidad de campo eléctrico y éste, a su vez, puede ser utilizado para la determinación de la densidad de flujo eléctrico. Por lo anterior, disponer de métodos que hacen posible llegar a determinar el potencial eléctrico, es una ayuda grande para la resolución de un determinado problema.

En la realidad, la tarea de determinar el potencial verdadero, es imposible, debido a que no se puede contar con la información necesaria para dicha tarea. Pero se tienen determinados métodos que permiten la determinación del potencial con suficiente exactitud para los fines de la ingeniería.

En lo subsiguiente se describirá, inicialmente, un método sencillo y práctico, que es de gran utilidad para la determinación de superficies equipotenciales, que si se toma en cuenta que en todo punto dichas superficies equipotenciales guardan siempre una relación de ortogonalidad con las líneas de campo eléctrico, es posible también trazar las líneas de campo eléctrico, a partir de las superficies equipotenciales con una exactitud satisfactoria. Seguidamente se presenta una solución por computadora de la ecuación de Laplace en dos dimensiones, que regularmente es llamado el método iterativo para la determinación del potencial eléctrico.

II.4.1 GRAFICADOR DE LÍNEAS EQUIPOTENCIALES Y CAMPO ELÉCTRICO

El montaje de este experimento es relativamente sencillo. Para tal efecto se necesita una hoja de papel conductor, cuya resistencia se encuentre en el rango de 5 K-ohms a 20 K-ohms por cuadrado. Este papel conforma el medio conductor entre dos electrodos a diferente

potencial. Además, se necesita una fuente de DC en el rango de 5 a 20 Volts; un multímetro; hojas de papel carbón y hojas de papel en blanco.

Debido a que el papel conductor tiene una resistencia finita, puede fluir por él una corriente producida por la diferencia de potencial entre dos electrodos conectados a la fuente de DC. Si la punta común del multímetro se conecta al electrodo conectado a la parte negativa de la fuente, es posible detectar puntos con determinada diferencia de potencial con dicho multímetro, marcarlos y, después, unirlos con lápiz para obtener líneas equipotenciales al nivel de potencial deseado.

Actualmente se puede contar con un juego de materiales fabricados para este fin, que se denomina PASCO Scientific MODEL PK-9013 Field Mapper, que trae 100 hojas de papel conductor y los elementos necesarios para realizar el experimento; además, trae un manual de instrucciones y guía de experimentos, el cual se muestra en la siguiente figura.

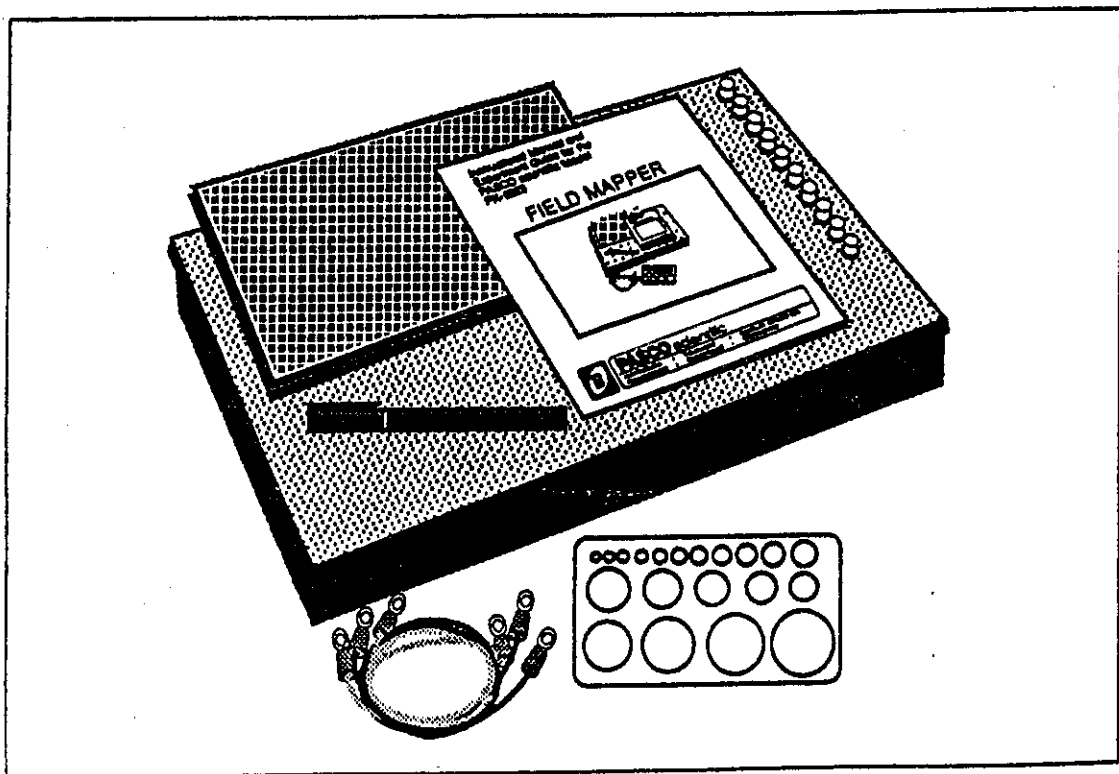


Figura No. II.9 Juego de materiales para trazar líneas equipotenciales

El montaje del experimento se ilustra a continuación:

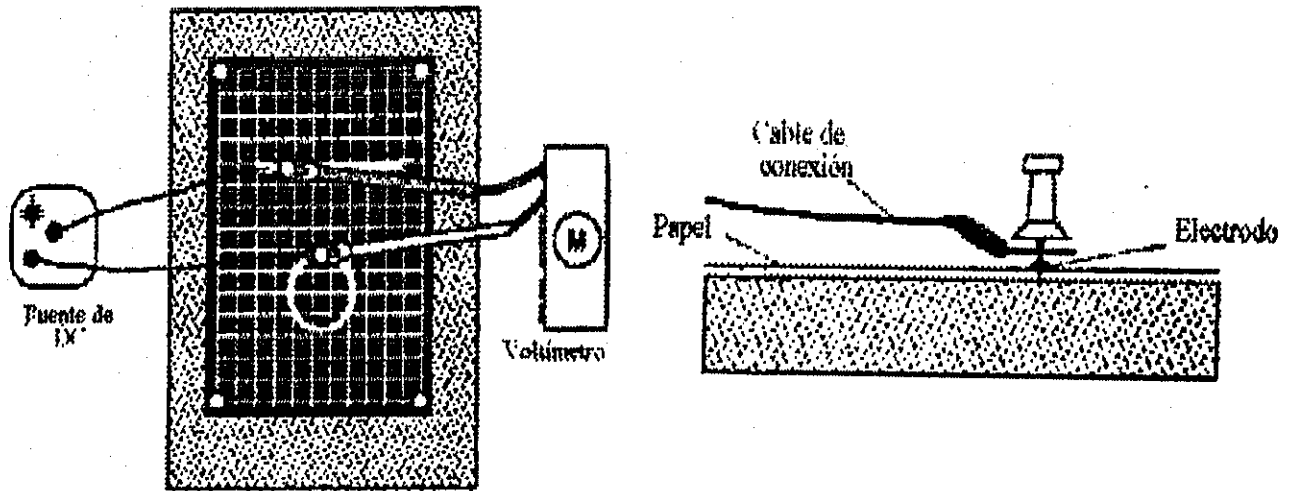


Figura No.II.10 Montaje del experimento de trazado de líneas equipotenciales.

II.4.2 MÉTODO ITERATIVO DE SOLUCIÓN A LA ECUACIÓN DE LAPLACE EN DOS DIMENSIONES

Muchas veces se necesita determinar el potencial, en donde el potencial está determinado completamente sobre la frontera de una región determinada. En los libros de texto se sugiere un método iterativo para la resolución de este tipo de problemas, en donde el potencial no varía en una dimensión, es decir, el problema es sólo en dos dimensiones.

La ecuación que se utiliza para la resolución del valor del potencial eléctrico en determinados puntos, con este método, es la Ecuación de Laplace para dos dimensiones:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0$$

en el cual se puede hacer la aproximación del valor de las derivadas parciales para un punto situado, simétricamente, a la mitad de la distancia que separa dos puntos cualesquiera, A y B. Esta aproximación es: $\frac{\partial V}{\partial x} \approx (V_1 - V_2)/h$, donde h es la distancia que separa los dos puntos A y B, en cuya mitad está situado el punto para el cual se aproxima la derivada parcial.

En la siguiente figura se ilustra la situación anteriormente mencionada:

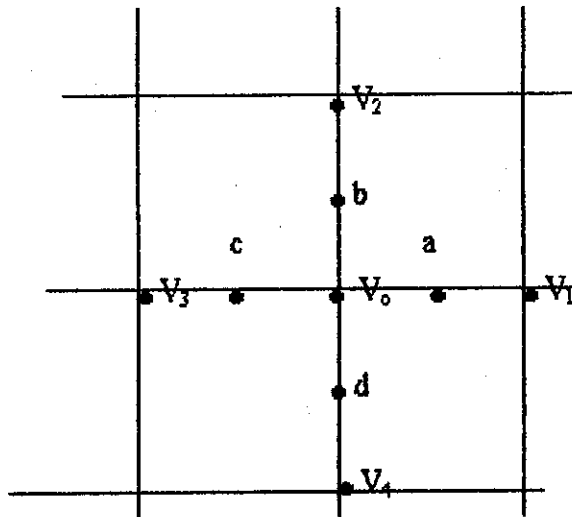


Figura No. II.11

Al combinar las expresiones para cuatro puntos distintos, a, b, c y d, como los que se muestran en la figura II.11, es decir, para dos puntos en el eje x y dos puntos en el eje y, se obtiene la siguiente expresión para el valor aproximado del valor del potencial eléctrico para el punto central V_0 :

$$V_0 \approx 1/4(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)$$

Esta ecuación adquiere mayor exactitud conforme el intervalo que separa los puntos que se consideran, tiende a cero. Lo que significa esta ecuación anterior, es que el potencial V_0 es el promedio del potencial de los cuatro puntos adyacentes.

Esta expresión para V_0 , es la que se utiliza para el cálculo con el método iterativo, que determina el valor del potencial en la esquina de cada subdivisión cuadrada. La iteración se repite cuantas veces sea necesario, hasta que el valor que se obtiene ya no varíe más.

El procedimiento detallado para el método iterativo aparece en los libros de texto y un listado del programa de computadora para la solución del mismo, se muestra en el Apéndice A, del presente trabajo de tesis, el cual queda para que pueda ser mejorado y ampliado para figuras geométricas más complicadas.

Las características del programa son los siguientes:

- el programa está hecho en lenguaje PASCAL y está diseñado para cálculos iterativos de problemas donde es posible la aplicación de este método de resolución de problemas

bidimensionales, en los que se especifica completamente los valores del potencial eléctrico en las fronteras de la región que se considera.

En este caso, sólo pueden trabajarse regiones con una forma geométrica cuadrada, en cuyos cuatro lados se encuentra especificado el valor del potencial eléctrico.

Cuando se activa el programa ejecutable, aparecerá en la parte superior de la pantalla, el siguiente mensaje:

"Ingrese los valores de los Bordes"

el cual se refiere al ingreso de los valores correspondientes del potencial en las fronteras (cuatro lados) del cuadro. Para esto, el programa acepta un valor de potencial de hasta siete dígitos, para cada lado, los cuales pueden ser valores enteros o decimales. Estos valores se ingresan de la manera siguiente:

Voltaje Superior =

Voltaje Inferior =

Voltaje Izquierdo =

Voltaje Derecho =

Seguidamente, se debe indicar el número de divisiones (cuadros) que se necesita hacer al cuadro original. Los problemas que aparecen en los libros de texto, regularmente, necesitan menos de 15 divisiones. Por lo que para éste programa se dejó como límite máximo 60 divisiones, el cual es un valor exagerado para efectos prácticos.

Luego de esto, el programa empieza a trabajar las iteraciones correspondientes, desplegando en la pantalla la figura cuadrada con los valores del potencial especificado para los bordes y el número de divisiones que se indicó, como puede apreciarse en la figura que se muestra en la siguiente página.

Sin importar la parte del programa en que el usuario se encuentre, podrá salir del mismo presionando la tecla ESC. En este momento aparecerá en la parte superior de la pantalla el siguiente mensaje: "Desea Continuar S/N", para el cual, usando la tecla correspondiente a la letra S, vuelve al inicio del programa para ingresar nuevos datos y usando la tecla de la letra N, saca del programa. Además, presionando F1 despliega un menú de ayuda, con indicaciones del funcionamiento de determinadas teclas dentro del programa.

Presionando la tecla correspondiente a la letra L, se ingresa a la opción de trazado de líneas equipotenciales. El programa pregunta el número de líneas que se desea, las cuales pueden ser hasta un máximo de 99, puesto que un número grande de líneas, ya no permite apreciar los contornos equipotenciales.

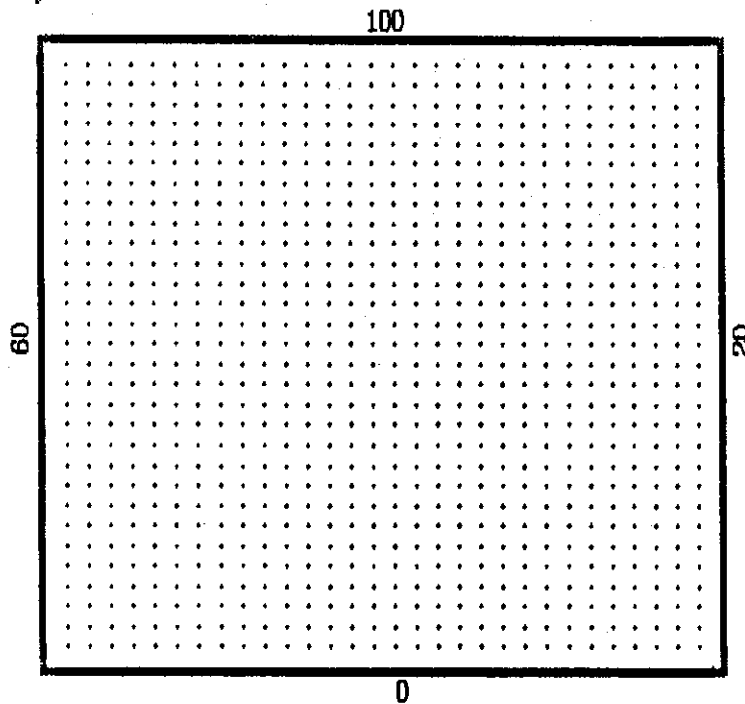


Figura No. II 12
Formato que aparece
en pantalla, al momen-
to de efectuar las
iteraciones.

En cuanto el programa termine con las iteraciones, podrá obtenerse el valor del potencial correspondiente a cada punto, moviéndose con las teclas de flechas. Si se quiere cambiar de los puntos a las líneas equipotenciales se presiona la tecla TAB, la cual es la misma para cambiar de las líneas a los puntos. El valor del voltaje aparecerá en la parte superior izquierda de la pantalla con aproximaciones de hasta centésimas de volts.

Valor Actual= 72.58

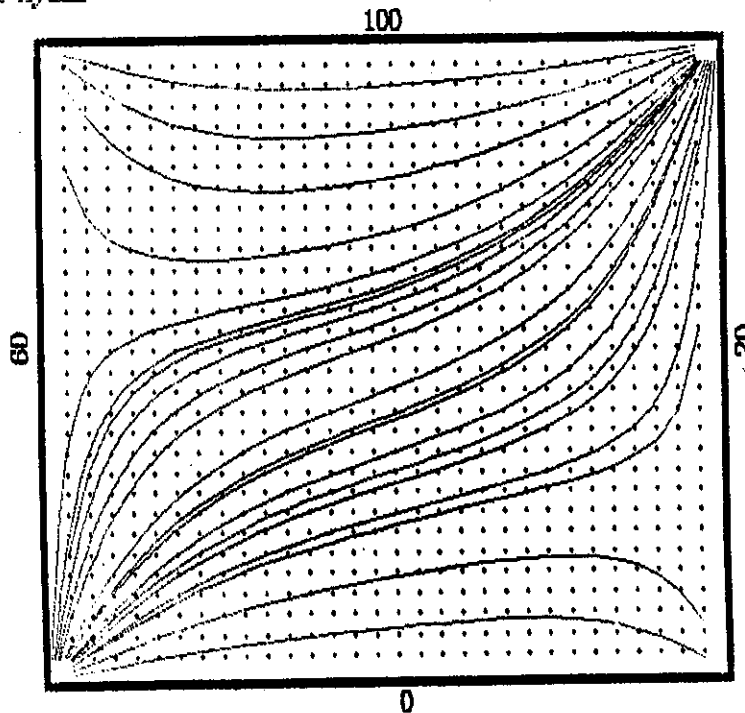


Figura No. II 13
Líneas equipoten-
ciales correspon-
dientes a los valores
de frontera
especificados.

Definición Teórica de Capacitancia.

Existe un dispositivo que se obtiene de dos materiales conductores homogéneos separados por un material dieléctrico; donde uno de los conductores posee una cantidad de carga positiva Q , en tanto que el otro material conductor, posee una cantidad igual de carga solo que negativa; de tal manera que, como no se consideran otras cargas presentes, el sistema poseerá una carga total igual a cero.

Si se considera que V_0 es la diferencia de potencial existente entre los materiales conductores, la capacitancia puede definirse como: *la relación que existe entre las magnitudes de la carga total de cualquiera de los conductores y la diferencia de potencial que existe entre ellos.* Y en forma de ecuación:

$$C = Q/V_0$$

También puede decirse que la capacitancia es la capacidad de almacenaje de carga por unidad de voltaje, por lo tanto, cuanto mayor sea el valor de la capacitancia, mayor capacidad habrá de almacenar energía por cada unidad de diferencia de potencial que se aplique a los dos materiales conductores.

Si se toman las definiciones generales tanto de carga eléctrica, como de diferencia de potencial eléctrico, las cuales son

$Q = \int \epsilon E \cdot dS$ y $V = - \int E \cdot dL$, se obtiene que el valor de la capacitancia depende únicamente de la permitividad del medio existente entre los dos materiales conductores, el área de dichos materiales y la distancia de separación que tienen ambas, así:

$$C = \epsilon A/d$$

Se llama capacitor a un dispositivo cuya característica es la de presentar determinada capacitancia

II.5 LA TIERRA Y SU ATMÓSFERA COMO UN CAPACITOR ESFÉRICO

En el tema de electrostática, es importante considerar el comportamiento que la tierra juntamente con su atmósfera presenta. Porque esto ayuda a que el estudiante relacione hechos y fenómenos naturales que lo rodean, con los conocimientos que va adquiriendo respecto del potencial y los campos eléctricos. Ya que, regularmente, los libros de texto no ejemplifican el tema de esta manera, sino, más bien, abordan el tema con ejemplos de capacitores que tienen

una forma muy poco aplicativa, que lejos de motivar al estudiante para que se interese en el tema, hacen que preste muy poca atención, por el mismo hecho de alejarse de su realidad cotidiana y/o natural.

Un hecho relevante es que el sistema electrostático tierra-atmósfera, es un sistema que se aproxima a un capacitor esférico.

Cerca y en la superficie de la tierra, en condiciones atmosféricas buenas, es decir, con una humedad relativa baja, existe un campo eléctrico relativamente intenso y constante del orden de 100 V/m. La magnitud de este campo eléctrico, decrece con la altura o elevación sobre la superficie de la tierra y el vector de Pointing del campo eléctrico, apunta hacia el centro de la tierra.

La existencia de un campo eléctrico atmosférico E y la conductividad eléctrica finita y no uniforme σ de la atmósfera, implican la existencia de una densidad de corriente j y una densidad de carga ρ en la atmósfera, como si se tuviera una superficie cargada con una densidad de carga ρ , en la superficie de la tierra.

Usando dos de la ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + (\partial \mathbf{D} / \partial t) \quad (2)$$

donde:

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad \text{y} \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (4)$$

se puede resolver para estas propiedades eléctricas del sistema tierra-atmósfera. En las ecuaciones anteriores, D es la densidad de flujo eléctrico, H es la intensidad de campo magnético y ϵ_0 es la permitividad del aire.

La conductividad eléctrica de la atmósfera puede ser aproximada como

$$\sigma(r) = [3 \times 10^{-14} + 0.5 \times 10^{-20}(r - r_0)^2] \text{ mho/m} \quad (5)$$

para las primeras pocas decenas de kilómetros sobre la superficie de la tierra. Donde r es la distancia radial cuyo origen es el centro de la tierra y r_0 es el radio de la tierra, cuyo promedio es, aproximadamente, 6×10^6 m. Arriba de, aproximadamente, 50 km la atmósfera puede ser considerada como un conductor perfecto por los campos esencialmente estáticos considerados. La fuente del incremento de la medida de la conductividad con la altura, es la radiación cósmica en la parte baja de la atmósfera, y la radiación solar en la parte alta.

Tomando la divergencia de ambos lados de la ecuación (2) para el caso en que no se tenga variación en el tiempo, se tiene:

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (6)$$

asumiendo una simetría esférica, se tiene:

$$(1/r^2)(\partial r^2 j_r / \partial r) = 0 \quad (7)$$

Lo cual se desarrolla como:

$$j_r = K/r^2 \quad (8)$$

con K evaluada en la superficie de la tierra con la Ec. (3):

$$j_r(r) = \sigma(r_s) E_r(r_s) r_s^2 / r^2 \quad \text{A/m} \quad (9)$$

Con las ecuaciones (5) y (9) y tomando en cuenta que $E_r(r_s) = -100 \text{ V/m}$

se puede determinar la densidad de corriente cerca de la superficie de la tierra, que es $j_r = -3 \times 10^{-12} \text{ A/m}^2$, aproximadamente, como valor promedio.

De las ecuaciones (3) Y (9), la intensidad del campo eléctrico en la atmósfera, es:

$$E_r(r) = \sigma(r_s) E_r(r_s) r_s^2 / \sigma(r) r^2 \quad \text{V/m} \quad (10)$$

y su dirección es hacia el centro de la tierra. La densidad de carga superficial en la tierra, puede ser determinada de las condiciones de frontera en la densidad de flujo eléctrico, que se deriva de la ecuación (1) y es $\rho = \epsilon_0 E_r(r_s)$. El valor resultante es del orden de $1 \times 10^9 \text{ C/m}$. Por lo tanto, la carga negativa total en la tierra, es del orden de $1 \times 10^6 \text{ C}$. La diferencia de potencial entre la tierra y la región altamente conductora a unos 50 km sobre su superficie, se encuentra por integración de la ecuación (10) con límites de r , a 50 km. El resultado es una diferencia de potencial de alrededor de 300,000 V con la mayor parte de la caída del voltaje por debajo de los 20 km. Tomando en cuenta el promedio de la diferencia de potencial y la corriente total, se tiene que la resistencia de la atmósfera, es por lo tanto, del orden de 100 Ω .

La densidad de carga de la atmósfera se encuentra de las ecuaciones (1) y (10)

$$\rho(r) = \{[\epsilon_0 \sigma(r_s) E_r(r_s) r_s^2] / r^2\} [\partial / \partial r] [1 / \sigma(r)] \text{ C/m}^3 \quad (11)$$

o con la ecuación (5)

$$\rho(r) = - \{[\epsilon_0 \sigma(r_s) E_r(r_s) r_s^2] / [\sigma(r)^2]\} \times 10^{-20} (r - r_s) \text{ C/m}^3 \quad (12)$$

y es positiva. Aproximadamente, a 1 km de altura, la ecuación (12) da una densidad de carga del orden de $0.1 \mu\text{C/m}^3$. La densidad de carga espacial medida a unos pocos metros de la tierra es típicamente del orden de $10 \mu\text{C}$, debido a que el efecto local no está incluido en la presente discusión.

La carga positiva total en la atmósfera puede encontrarse con la ecuación (11)

$$Q_{\text{atm}} = \int \rho(r) 4\pi r^2 dr \quad (13)$$

que valuada para una integral con límites entre r_e y 50 Km, se obtiene:

$$Q_{\text{atm}} = -4\pi \epsilon_0 r_s^2 E_r(r_s) \text{ C}$$

si se asume que la conductividad a 50 Km de altura es infinita

$$-\sigma(50\text{km}) = \infty -$$

De esta manera se encuentra que la carga en la atmósfera es igual en magnitud y de signo opuesto a la carga en la superficie de la tierra.

En todo el análisis anterior se ha asumido que se cuenta con un ambiente cuya humedad relativa es muy baja y se tienen condiciones esencialmente estáticas, tomando el sistema eléctrico tierra-atmósfera sin haberse preguntado cuál es la fuente de la carga en la tierra y la atmósfera. Si la carga de la tierra no fuera continua, el flujo de corriente neutralizaría tal carga con una constante de tiempo del orden de 10 minutos. Sin embargo, para una región con alto nivel cerámico, esto se comporta como un "acumulador" que descarga la tierra cargada por medio de un rayo a tierra cargado negativamente y corona positiva al nivel de la tierra.

El problema que fué examinado, puede con una buena aproximación, ser tratado como como planar más bien que como esférico si se toma en cuenta que el radio de la tierra es de alrededor de 6×10^6 m y sólo se está considerando una altura máxima de 5×10^4 m sobre la superficie de la tierra. Sin embargo, es considerablemente de un valor más pedagógico utilizar coordenadas esféricas.

En este análisis se ha ignorado el efecto de convección. Generalmente, en una distancia comprendida en el orden de 1 km de la superficie de la tierra, el efecto convectivo tiende a igualar los parámetros eléctricos dentro de tal distancia y puede causar importantes efectos locales.

II.5.1 MEDICION EXPERIMENTAL DEL CAMPO ELECTRICO DE LA TIERRA

Marco Teórico. Para la medición práctica del campo eléctrico de la tierra, se considera que la Ionósfera está cargada positivamente y, como consecuencia, la superficie de la tierra cargada negativamente y existirá entre ambos un campo eléctrico que será posible medir, experimentalmente.

Las ecuaciones importantes aplicables, son:

Ley de Gauss: $E = Q_{enc}/\epsilon_0 A$, y la Ley de Ohm: $J = \sigma E$.

Los cálculos teóricos mencionados anteriormene, indican que cerca de la superficie de la tierra, el campo eléctrico tiene un valor del orden de 100 V/m, pero este valor está condicionado totalmente por las condiciones atmosféricas, es decir, la humedad relativa existente en el medio, en el momento de efectuarse la medición.

Diseño y Ejecución. Las condiciones ideales para la medición experimental del campo eléctrico de la tierra, requieren que se tenga un día soleado en un campo abierto lejos de árboles y casas. Ya que en estas condiciones, la humedad relativa del medio es baja y no se tienen perturbaciones de las superficies equipotenciales por causa de irregularidades de la superficie de la tierra. Además, un campo con muy baja hierba será el lugar más apropiado. Lo que va a medirse es la diferencia de potencial entre dos puntos a distinta altura sobre el nivel del suelo para, luego, aplicar la ecuación que permite hallar el valor de la intensidad de campo eléctrico a partir del potencial eléctrico. Se utiliza una varilla de madera (para tener un material aislante), de una longitud aproximada de unos 3 metros, para obtener valores razonables de diferencia de potencial. En el extremo superior de la varilla de madera se utiliza una lata metálica conteniendo un material combustible, el cual debe incendiarse a la hora de la medición. El propósito de esto, es que se ionice el aire circundante para que la lata metálica tenga el mismo potencial que su entorno. Conectado a la lata, debe encontrarse un alambre de cobre, cuyo otro extremo estará conectado al aparato de medición de la diferencia de potencial, que estará midiendo la diferencia de potencial entre la lata con el material combustible y la superficie de la tierra. Debido a que se espera medir valores relativamente grandes de diferencia de potencial eléctrico, en ausencia de otro voltímetro apropiado, se recomienda utilizar un electroscopio. Este electroscopio puede calibrarse previamente observando la desviaciones que experimenta para determinadas diferencias de potencial.

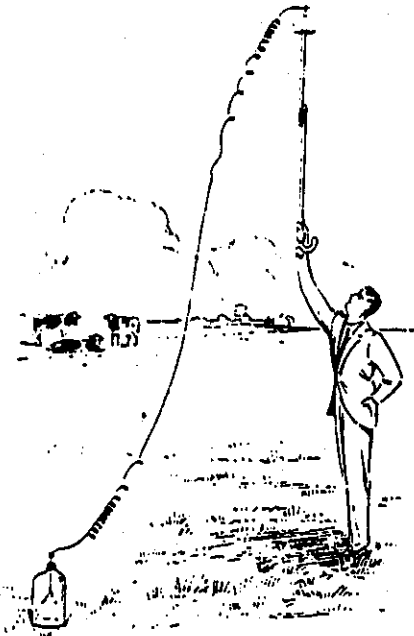


Figura No. II 14

Ilustración de la manera en que se lleva a cabo la medición del campo eléctrico de la tierra.

Cuando el material dentro de la lata metálica esté combustionando a una determinada altura sobre la superficie de la tierra, se notará una desviación clara del electroscopio. Si se quiere saber el signo de la carga (positiva o negativa) se frota una barra de material plástico y se acerca al electroscopio. Si la desviación disminuye con esta acción, significa que la carga es positiva, lo cual implica que la tierra tiene una carga negativa en comparación con un punto más alto sobre su superficie.

Se debe tomar en cuenta que la diferencia de potencial entre un par de puntos a diferente altura en la atmósfera cambia con las condiciones atmosféricas de cada día. En época de verano, la diferencia media de potencial en cada metro es de 60 voltios. En invierno, esa diferencia media será de, aproximadamente, 500 voltios. Debe tomarse en cuenta que debido a las condiciones atmosféricas cambiantes día a día, existirán eventuales discrepancias entre los cálculos teóricos y los experimentales.

Cuando se tiene algún material metálico a una altura de 2 metros sobre la superficie de la tierra y que esté completamente aislado de ésta, se tendrá una diferencia de potencial entre el material metálico y la tierra de, aproximadamente, 200 Voltios; pero tocarlo no es peligroso, porque la carga es tan baja que la corriente en el cuerpo humano no se nota.

Cuando llueve, la diferencia de potencial en cada metro cambia y puede llegar a tenerse diferencias de potencial de 1000 V cada metro cuando se acerca algún chaparrón. Por debajo de las nubes cargadas de lluvia, la dirección del campo eléctrico cambia 180 grados. Esto es lo que ocurre durante las tormentas y es por eso que casi todas las descargas electroatmosféricas son desde la tierra hacia la nube.

Una medición experimental del campo eléctrico de la tierra, fue llevada a cabo sobre el edificio T-3 de la Facultad de Ingeniería de la USAC. Para lo cual se utilizó como voltímetro un electroscopio que fue calibrado previo a la medición, por medio de una fuente de alto voltaje DC. El procedimiento fue llevado a cabo tal como se describe anteriormente. Los valores de voltaje e intensidad de campo eléctrico obtenidos concuerdan bastante bien con los cálculos teóricos, tomando en cuenta que sobre cualquier edificio, las superficies equipotenciales están más concentradas.

Los valores obtenidos (promedio de 5 mediciones diferentes) en la medición del campo eléctrico de la tierra, son los que se presentan en la siguiente tabla:

| DESVIACION DEL ELECTROSCOPIO | ALTURA (m) | DIFERENCIA DE POTENCIAL (V) | INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO (V/m) |
|------------------------------|------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 9 | 3.28 m | 2.30×10^3 | 700 |

II.6 MEDICIÓN POR COMPUTADORA DEL PROCESO DE DESCARGA DE UN CAPACITOR

Para llevar a cabo esta medición, se hizo uso del equipo denominado **Interface Program COACH**. Este equipo consta tanto del software correspondiente, como de elementos de hardware para llevar a cabo las distintas mediciones necesarias. Como parte de este equipo, se dispone de una serie de sensores de distintos parámetros de experimentos físicos, por lo que su aplicación y utilización no se limita solo a experimentos de electromagnetismo, sino que en general a cualquier tema de las ciencias experimentales.

Respecto del funcionamiento y utilización de este equipo, se dispone de información en el **Apéndice B** de ésta tesis.

La medición se llevó a cabo para un circuito RC simple en el que se utilizó un resistor de $2.2\text{ k}\Omega$ y un capacitor de $1000\text{ }\mu\text{F}$.

Por supuesto antes de realizar la medición de la descarga del capacitor en función del tiempo, se efectuó la calibración y todos los ajustes necesarios, para obtener la mejor gráfica posible.

En la siguiente figura se muestra en forma esquemática el montaje del experimento realizado.

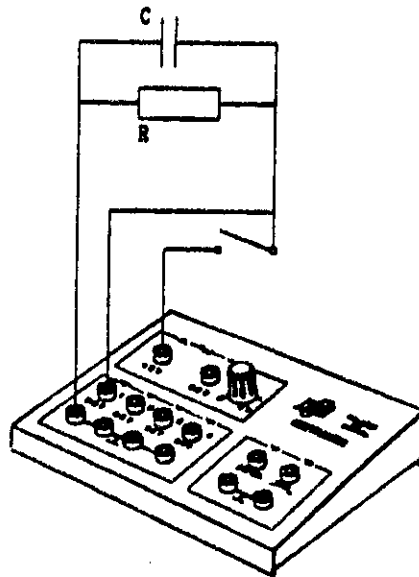
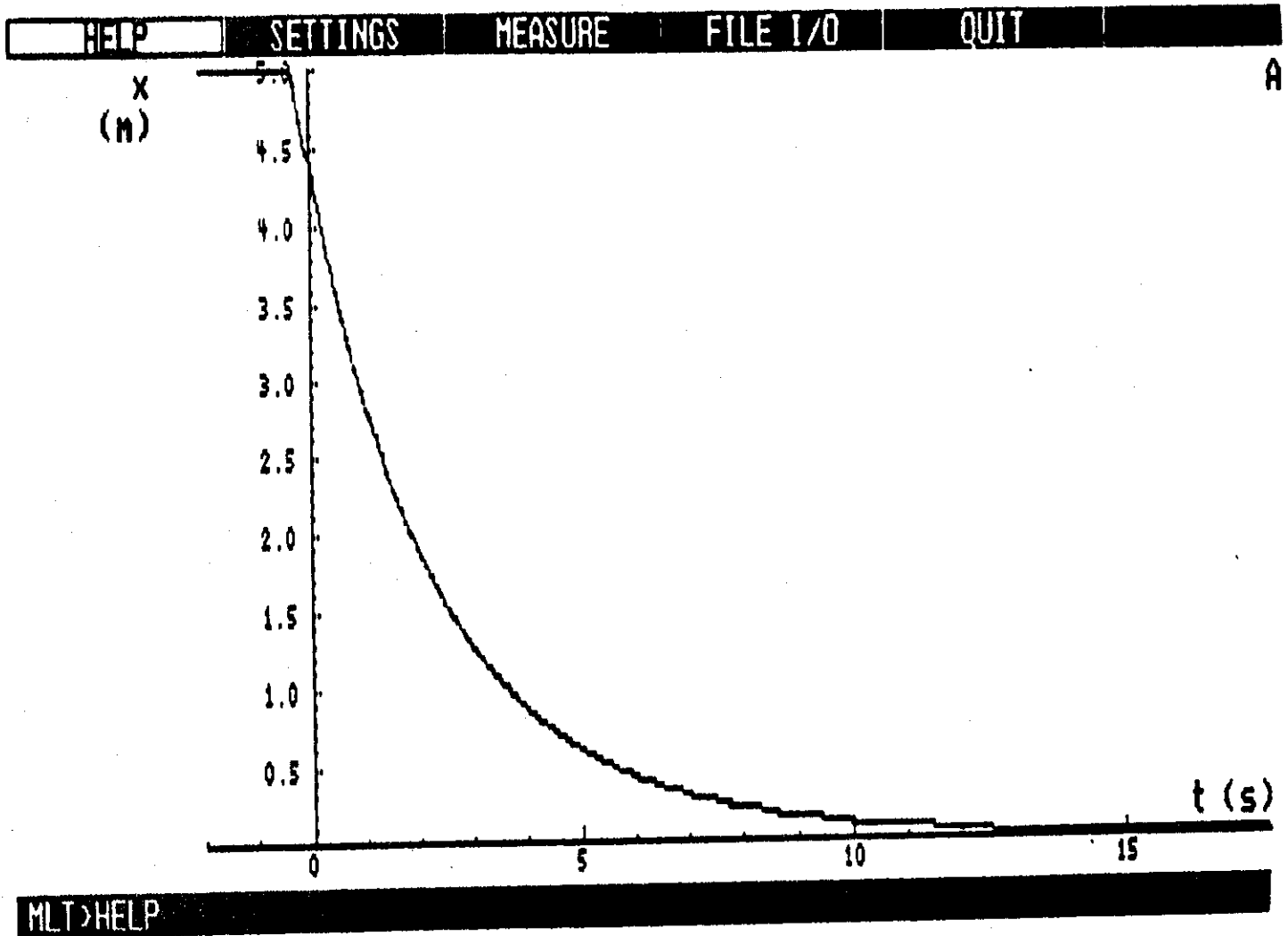


Figura No.II.15 Esquema del montaje del experimento realizado.

El resultado obtenido se muestra en la siguiente figura, la cual ya se encuentra procesada, es decir, se utilizó la opción PROCESSING del menú principal del programa IP-COACH, para filtrar la señal obtenida; en otros términos se eliminó el ruido existente.



Gráfica No.II.1 Resultado de la medición de la descarga de un capacitor utilizando un circuito RC sencillo con $R = 2.2 \text{ k}\Omega$ y $C = 1000 \mu\text{F}$.

Como puede apreciarse, el resultado obtenido es precisamente el esperado, ya que, teóricamente, el comportamiento de la diferencia de potencial en las terminales de un capacitor varía de forma exponencial, variando con un ritmo proporcional a $e^{-t/RC}$. Además, se espera que el circuito llegue a su estado permanente en un tiempo aproximado de 5τ ($\tau = RC$) que en éste caso debe ser 11seg. y es lo que, precisamente, se observa en la gráfica obtenida.

DEFINICIONES TEÓRICAS DE CAMPO MAGNÉTICO E INDUCTANCIA

El campo magnético tiene una similitud grande con el campo eléctrico. En este caso, la fuente de un campo magnético puede ser un imán permanente, una corriente directa (carga eléctrica en movimiento) o un campo eléctrico que cambia linealmente con el tiempo.

Oesterd descubrió que cualquier conductor por el que circula una corriente I , está rodeado por una región en la que actúan fuerzas sobre un imán o sobre la aguja de una brújula. Cuando se examina este campo con la brújula, se encuentra que ésta siempre se alinea en una dirección que es perpendicular al conductor y una línea radial que va desde el conductor hacia dicha brújula. Este alineamiento es paralelo al campo magnético. Este campo magnético forma espiras circulares cerradas alrededor del conductor. La dirección que tiene el campo magnético obedece a la regla de la mano derecha, en que el dedo pulgar apunta en la dirección que sigue la corriente y los otros cuatro dedos indican la dirección del campo magnético, como se ve en la siguiente figura:

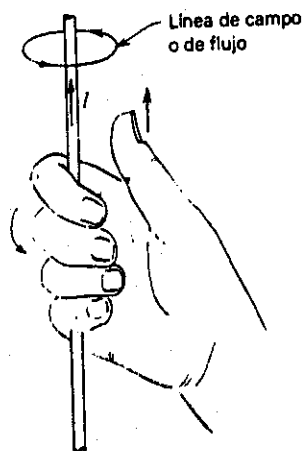


Figura No. II.16 La regla de la mano derecha relaciona la dirección de las líneas de campo o de flujo magnético con los dedos y la dirección de la corriente con el pulgar.

La ley de Biot-Savart, establece que la intensidad del campo magnético en el entorno del conductor con corriente está dado por la siguiente expresión:

$$dH = [I dL \times a_r] / 4\pi R^2$$

la cual sólo puede verificarse, experimentalmente, en su forma integral, que está dada por:

$$H = \int [IdL \times a_r] / 4\pi R^2$$

Al campo magnético también se asocian líneas que ilustran la forma y la dirección que tiene dicho campo. Y al igual que con el campo eléctrico, estas líneas no son reales, sólo son un artificio que ayuda a comprender la forma y dirección que tiene el campo magnético en una región determinada.

En la siguiente figura se muestra las líneas de campo magnético alrededor de un conductor con corriente.

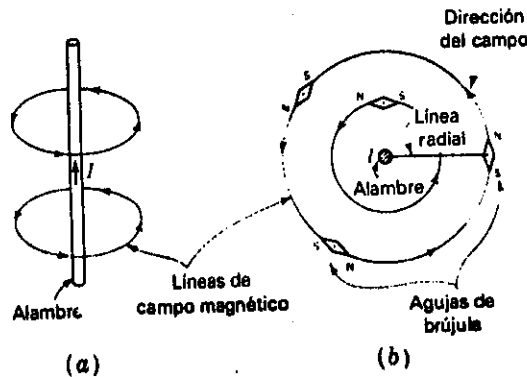


Figura No. II.17 a) campo magnético alrededor de un alambre por el que fluye corriente, b) sección transversal perpendicular al alambre, en la que la corriente fluye hacia afuera de la página.

La ley de circuitos de Ampere establece que, *la integral de línea de la intensidad de campo magnético H en una trayectoria cerrada es igual a la corriente constante encerrada por tal trayectoria.* Que en forma de ecuación es:

$$\int H \cdot dL = I_{enc.}$$

La convención de signos en cuanto a la corriente es, que se toma como positiva aquella que fluye en la dirección de avance de un tornillo de rosca derecha que gira en la dirección en donde recorre la trayectoria cerrada.

Al igual que con campos eléctricos, cuando se tratan campos magnéticos es necesario definir un *potencial magnetostático* U.

Cuando se aplica la ley de Ampere a una trayectoria cerrada que no encierra ninguna corriente, se tiene:

$$\int H \cdot dL = 0$$

Cuando se tiene esta condición, la intensidad de campo magnético puede encontrarse a partir de un potencial magnetostático U , en la misma forma que se relaciona el campo eléctrico y el potencial eléctrico ($\mathbf{E} = -\nabla V$), es decir:

$$\mathbf{H} = -\nabla U$$

en forma integral, se tiene: $\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = U_1 - U_2$

Por otro lado, se tiene la ley de Ampere, de tal manera que ahora se tiene:

$$\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I = F$$

donde F es llamada *fuerza magnetomotriz* (fmm) y es igual a la corriente total encerrada.

Definición Teórica de Inductores e Inductancia. El dispositivo que tiene la propiedad de almacenar energía en un campo magnético se llama *inductor*. Este dispositivo es considerado el similar magnético de un capacitor, que almacena energía en un campo eléctrico. Existen distintos tipos de inductores, tales como: espiras, bobinas, solenoides y toroides.

Por definición, la *inductancia* L es *la razón de los concatenamientos totales de flujo magnético a la corriente I a través de un inductor*.

$$L = \lambda/I$$

si todas las líneas de flujo abarcan todas las vueltas del inductor de que se trate, el concatenamiento total de flujo magnético de la bobina es igual al flujo magnético total ψ_m por el número de espiras o vueltas, entonces:

$$L = N\psi_m/I \text{ (Henrios).}$$

Las dimensionales de la inductancia son, Henrios o Weber/Ampere.

LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY

Cuando un campo magnético varía con el tiempo, se produce una *fuerza electromotriz* (fem) que puede producir una corriente en cualquier circuito cerrado. La fuerza electromotriz no se trata de otra cosa más que un voltaje procedente de los conductores que se mueven en un campo magnético o de campos magnéticos variantes.

La ley de inducción de Faraday suele expresarse como:

$$\text{fem} = -d\phi/dt \text{ Volts}$$

La ecuación anterior se cumple en una trayectoria cerrada; esta trayectoria cerrada no necesariamente debe ser conductora. El flujo magnético es el flujo que cruza la sección

transversal cuyo perímetro es el considerado para la trayectoria cerrada y $d\phi/dt$ es la razón de cambio de dicho flujo respecto del tiempo.

La variación del flujo con el tiempo puede deberse a cualquiera de las siguientes razones: a) un flujo que cambia con el tiempo circundando una trayectoria cerrada fija, b) el movimiento relativo entre un flujo estable y una trayectoria cerrada, c) una combinación de las dos circunstancias anteriores.

La **ley de Lenz** establece que el voltaje inducido actúa para producir un flujo opuesto. Es decir, la fem tienen una dirección tal, que produce una corriente cuyo flujo, si se adiciona al flujo original, reduciría la magnitud de la fem. Esto anterior es el significado físico del signo menos que afecta el lado derecho de la ecuación de la ley de Faraday de inducción.

Cuando la trayectoria cerrada es un conductor enrollado de N vueltas, generalmente se logra una suficiente precisión al considerar que las vueltas coinciden y, entonces, la ecuación quedaría como:

$$\text{fem} = -N d\phi/dt$$

y, en este caso, ϕ se interpreta como el flujo que pasa a través de cualquiera de las N trayectorias.

1.7 LEY DE LENZ-VERSIÓN CORTA

Este es un experimento sencillo, pero, con él se logra ilustrar, claramente, la ley de inducción de Faraday, en combinación con la ley de Lenz.

De acuerdo con la ley de inducción de Faraday, un campo magnético variante, induce un campo eléctrico. El campo eléctrico inducido produce un flujo de corriente que a la vez produce un campo magnético. Entonces, si un campo magnético cambia en un conductor, puede producirse una corriente que produce otro campo magnético secundario. La ley de Lenz, establece que este campo magnético secundario siempre se opondrá **al cambio** en el campo original.

El experimento trata de, un disco de aluminio, no magnético, que se deja rodar hacia abajo a través de un canal de aluminio, de una longitud aproximada de 16 plg. Luego, se deja rodar de igual manera un imán. El movimiento del magneto (imán) induce una corriente en el canal, el cual, a la vez, produce un campo magnético que se opone al campo de magneto en

movimiento. Este campo de oposición retrasa el movimiento del magneto; entonces, le toma mayor tiempo caer a través del canal, en comparación con el primer disco que es de aluminio.

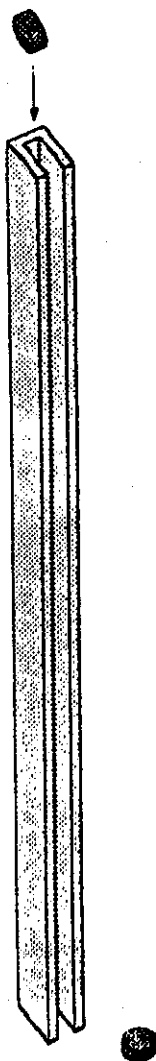


Figura No. II.18 Equipo y Montaje

En la siguiente figura se muestra un diagrama del magneto cayendo a través del canal.

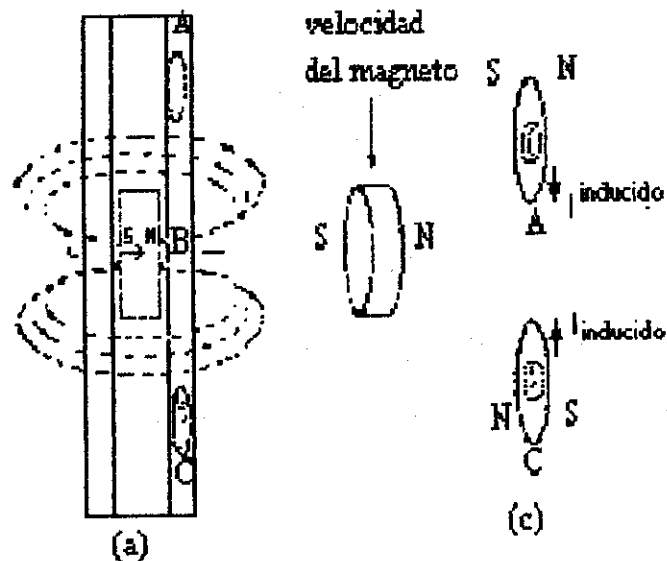


Figura No. II 19 Diagrama del imán cayendo por el canal de aluminio.

El polo Norte del magneto se encuentra en el lado derecho. En la figura se muestran, además, 3 posiciones en el lado derecho del canal, A, B y C.

En la posición A, el campo magnético decrece conforme cae el magneto. La ley de Lenz dice, que el campo inducido en la parte derecha, reduce el promedio, por lo tanto, decrecerá el campo total. En la posición B, el campo del magneto en movimiento es relativamente constante. Por lo tanto, no existe campo inducido en la posición B.

La dirección de las corrientes inducidas en el canal puede ser determinada utilizando la ley de inducción de Faraday, $\varepsilon = -d\phi/dt$, donde $d\phi/dt$ es el promedio del cambio en el flujo magnético a través de la sección transversal seleccionada del canal y ε es la fuerza electromotriz (fem) inducida alrededor de la sección transversal. La regla de la mano derecha, puede ser utilizada para determinar la dirección de la corriente. Si el flujo magnético a través del canal se incrementa, póngase el pulgar en la dirección contraria del campo magnético (por el signo menos de la expresión). Si el flujo magnético a través del canal se decrementa, póngase el pulgar en la misma dirección del campo magnético. En ambos casos, los otros dedos de la mano indicarán la dirección del flujo de corriente.

En la posición A, el campo magnético del imán apunta hacia el lado derecho, pero, el campo y, por lo tanto, el flujo, decrece conforme dicho imán desciende por el canal de aluminio. La corriente, por lo tanto, fluye en la misma dirección de las manecillas del reloj (viéndolo desde la izquierda) en tal sección transversal. En la posición B, el flujo debido al campo es constante. Por lo que no existen corrientes inducidas en la posición B. En la

posición C, el campo apunta hacia la derecha y el flujo aumenta conforme el imán descende. La corriente fluye, por lo tanto, en la dirección contraria a las manecillas del reloj (visto desde la izquierda).

Las corrientes circulantes en las posiciones A y C, producen campos magnéticos. La magnitud y la dirección de dichos campos pueden determinarse utilizando la ley de Ampere ($\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{L} = \mu_0 I$) y la regla de la mano derecha. Siguiendo la dirección del flujo de corriente con los dedos de la mano derecha encerrados. El dedo pulgar apuntará en la dirección del campo magnético. Utilizando esta regla, se puede mostrar que la dirección predicha por los campos inducidos es la misma predicha por la ley de Lenz.

II.8 MEDICIÓN POR COMPUTADORA DEL VOLTAJE INDUCIDO EN UNA BOBINA, POR LA QUE SE HACE PASAR UN IMÁN PERMANENTE

La realización de esta medición, también es por medio del equipo IP-COACH (véase Apéndice B). En este caso se utiliza el sensor de voltaje conectado a las terminales de una bobina de núcleo de aire. Luego de realizar el montaje correspondiente, por el centro de dicha bobina, se deja en caída libre un imán permanente, con el fin de observar la forma y magnitud del voltaje que se induce en la bobina de acuerdo con la ley de inducción de Faraday. El montaje realizado se muestra en la siguiente figura.

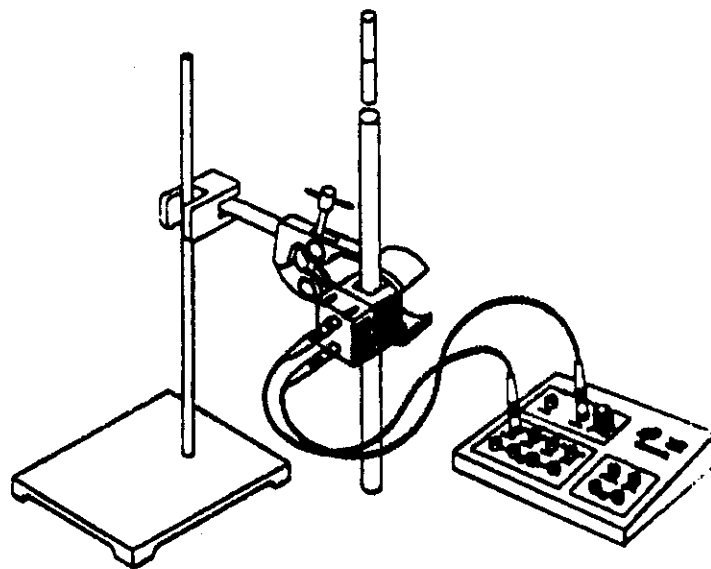
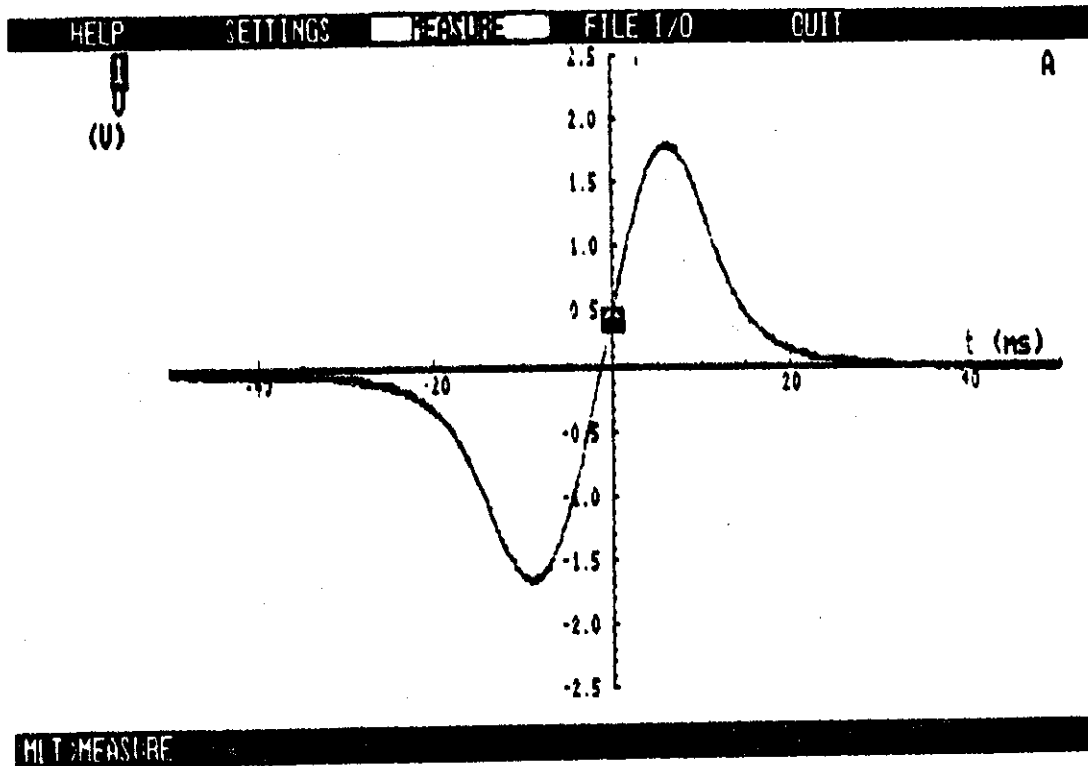


Figura No. II.20 Montaje del experimento realizado.

Para la realización de esta medición, al igual que para cualquier otra medición, se efectúa la calibración correspondiente y todos los ajustes necesarios para obtener una gráfica definida, lo mejor que permite el equipo utilizado.

Para la gráfica que se obtiene, también se tiene la necesidad de procesarla, es decir, eliminar el ruido existente y efectuar las filtraciones posibles para una mejor nitidez.



Gráfica No.II.21 Resultado obtenido de la medición del voltaje inducido en una bobina, en cuyo centro se deja en caída libre un imán permanente.

CAPÍTULO III

MATERIALES MAGNÉTICOS

DEFINICIONES TEÓRICAS

De manera general, todos los materiales presentan en cierto grado, algún comportamiento magnético, aunque en muchos de ellos el efecto es tan débil que no puede apreciarse.

De acuerdo con el comportamiento que los materiales presentan cuando se encuentran bajo el efecto de un campo magnético externo, se clasifican como: *diamagnéticos*, *paramagnéticos*, *ferromagnéticos*, *antiferromagnéticos*, *ferrimagnéticos* y *superparamagnéticos*.

Material diamagnético. En este tipo de material, los momentos del espín del electrón y orbital se cancelan, es decir, el momento magnético neto es igual a cero. Sin embargo, cuando se le aplica un campo magnético externo, el momento del espín excede ligeramente al momento orbital, de tal manera que se produce un momento magnético pequeño que se opone al momento magnético externo y de esta manera, un espécimen diamagnético experimenta una fuerza de repulsión cuando se le aplica un campo magnético externo.

Material paramagnético. Los átomos de este material están orientados al azar, de tal manera que pueden presentar un momento magnético neto pequeño. Cuando se le aplica un campo magnético externo, los dipolos atómicos tienden a alinearse con el campo y el momento magnético de la muestra aumenta con el número de átomos del mismo. Sin embargo, este alineamiento es muy débil, que las interacciones internas y la agitación térmica tienden a anular el proceso y sólo puede lograrse una magnetización parcial. Cuando un material paramagnético se acerca a un campo magnético externo, experimenta, aunque débil, una fuerza de atracción.

Materiales ferromagnéticos. En estos materiales, se facilita grandemente el proceso de alineamiento de los dipolos atómicos con algún campo magnético externo. En estos materiales ocurre un efecto cuántico llamado "acoplamiento de intercambio" entre átomos adyacentes en su estructura cristalina, que asegura sus momentos en una configuración paralela

rigida, en regiones llamadas *dominios*. Estos dominios pueden tener una variedad de formas y tamaños, que varía desde un micrómetro hasta varios centímetros, dependiendo del tamaño, la forma, el material y la historia magnética de la muestra. En la siguiente figura se muestran estos dominios y su comportamiento en el proceso de magnetización:

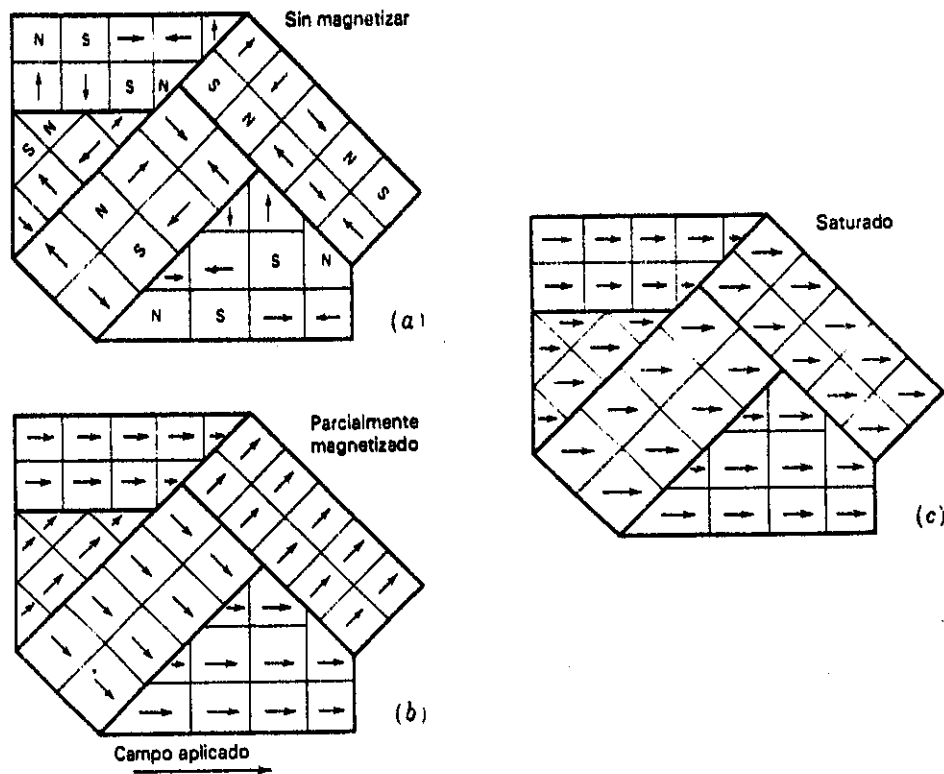


Figura No.III.1 Etapas sucesivas de magnetización de un espécimen policristalino con el aumento del campo. Las flechas indican la dirección de magnetización de los dominios.

Existe una temperatura crítica llamada "*Temperatura de Curie*", a la cual, el acoplamiento de intercambio desaparece y el material pasa paulatinamente a ser de un tipo paramagnético ordinario. A este fenómeno se le da el nombre de "*fase de transición ferromagnética*".

Las propiedades que presenta un material ferromagnético son: 1) llega a magnetizarse fuertemente en la misma dirección del campo magnético donde está colocado; 2) la densidad de flujo en los materiales ferromagnéticos varía en forma no lineal

con la intensidad magnética, con excepción de pequeños rangos donde la variación puede considerarse lineal; 3) los materiales ferromagnéticos presentan saturación, histéresis y retentividad.

En la siguiente figura se muestra un anillo o ciclo de histéresis de un material ferromagnético típico.

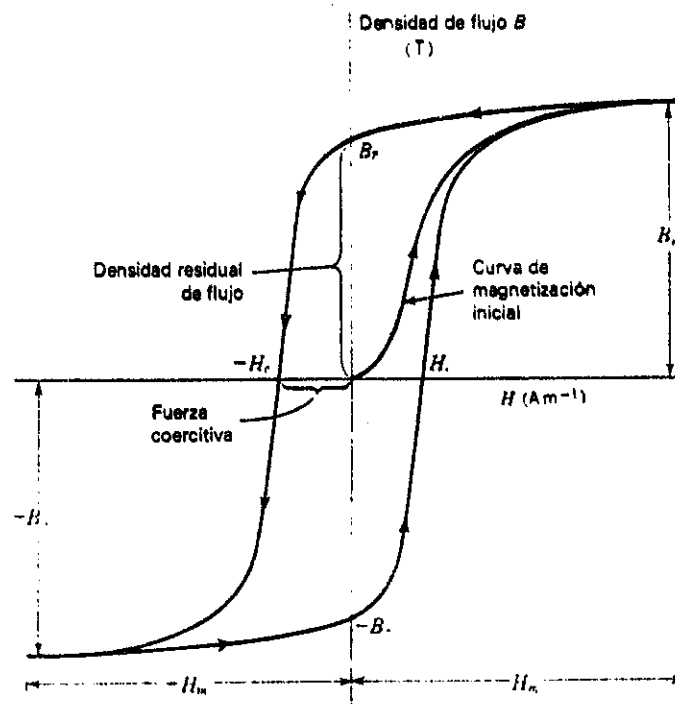


Figura No.III.2 Ciclo o anillo de histéresis.

La histéresis magnética, no es más que un fenómeno que ocurre en los materiales ferromagnéticos y es el hecho de que el flujo se vaya rezagando respecto de la intensidad magnética.

Los materiales ferromagnéticos son los de mayor interés en el campo de la ingeniería por la amplia variedad de aplicaciones que encuentran en las distintas áreas de la misma.

Materiales antiferromagnéticos. En estos materiales, las fuerzas entre átomos adyacentes se alinean en direcciones opuestas, de manera que el momento magnético neto de una muestra de este tipo, desaparece cuando se la aplica un campo externo. Estos materiales solo son afectados levemente con la presencia de un campo magnético externo.

Materiales ferrimagnéticos. Estos también muestran un alineamiento antiparalelo de momentos atómicos adyacentes; pero, los momentos no son iguales, de manera que existe un campo magnético neto que es menor que el de los materiales ferromagnéticos. A pesar de los efectos magnéticos más débiles, existe un grupo importante de materiales ferrimagnéticos llamados *ferritas*, que tienen una conductividad eléctrica de varios órdenes de magnitud mayor que la de los semiconductores, pero, menor que la de los ferromagnéticos, lo que las hace útiles en núcleos de inductores de corriente alterna y de transformadores por reducirse de éste modo, tanto las pérdidas por corrientes parásitas (inducidas) como las pérdidas térmicas (óhmicas).

Material Superparamagnético. Este consiste en un montaje de partículas ferromagnéticas en un aglutinante dieléctrico o matriz. A pesar de que existen dominios dentro de las partículas individuales, las paredes de dominio no penetran el material matriz. Con las partículas suspendidas en una delgada cinta plástica se puede cambiar súbitamente el estado de magnetización, de tal manera que en una cinta de longitud conveniente, puede almacenarse grandes cantidades de información de manera magnética. Estos materiales son utilizados en sistemas de grabación, audio y video.

III.1 LA ENSEÑANZA DEL TEMA DEL CAMPO MAGNETOSTÁTICO: PROPUESTAS DE SOLUCIÓN A LAS DIFICULTADES

Un problema con que regularmente se encuentra en la enseñanza del electromagnetismo, es el hecho de encontrarse con que la mayoría de estudiantes tienen dificultades en la resolución de problemas relacionados con la distribución de líneas de campo magnético, cuando se tienen materiales magnéticos duros y blandos.

Dos posibles causas de estas dificultades son:

- 1) la forma en que se trata el tema de las propiedades magnéticas de los materiales; en particular, el hecho de que la histéresis de estos materiales es mencionada muy a la ligera;

2) el hecho de que la intensidad de campo magnético H , se trata casi siempre, con mucha ligereza en el curso de electromagnetismo; es decir, se tiene un predominio de la inducción magnética B sobre la intensidad de campo magnético H , ya que ésta es la forma en que se enfoca el tema en los libros de texto.

Propuestas para tratar de remediar el problema de los estudiantes en éstos casos, son:

- a) distinguir cuatro tipos de materiales magnéticos idealizados en algunas pláticas introductorias al correspondiente tema en el curso de electromagnetismo o, bien, en coordinación con las sesiones de laboratorio de dicho curso. Estos cuatro tipos de materiales magnéticos, que es necesario diferenciar, son: no magnéticos, magnéticos blandos, magnéticos duros y materiales superconductores,
- b) enfatizar un poco más en la intensidad de campo magnético H , en vez de la inducción magnética B , cuando se tratan los problemas de magnetostática.

Un material magnético blando o, magnéticamente suave, es aquel cuyas características son las de presentar *un campo remanente muy bajo*, y una *permeabilidad muy alta*. Un material magnéticamente duro es aquel que tiene una *alta coercitividad*.

Lo que se trata a continuación se refiere a los fenómenos de magnetostática a nivel macroscópico.

III.1.1 CUATRO TIPOS IDEALIZADOS DE MATERIALES MAGNÉTICOS

Una forma típica de introducir el tema de las propiedades magnéticas, es empezando con el paramagnetismo y el diamagnetismo. Después de esto se discute el ferromagnetismo y se introduce la histéresis como un comportamiento típico de los materiales ferromagnéticos.

Este método o procedimiento no está del todo bien por dos aspectos (por lo menos como debiera ser en un tema introductorio a las características de los materiales magnéticos).

La primera crítica respecto del abordaje de este tema es concerniente al hecho de que uno empieza con paramagnetismo y diamagnetismo. Tales efectos son muy débiles (del orden de 1×10^{-6} a 1×10^{-4}) y, por lo mismo muy difícilmente observables. Se podría tener un mejor comienzo si se introduce, primero, fenómenos que presentan efectos fuertes, en éste caso los materiales ferromagnéticos. Este procedimiento es completamente legítimo y absolutamente usual en otros campos de la física. Por ejemplo, en mecánica donde se trata con mucha

naturalidad una barra metálica como un cuerpo completamente rígido, despreciando su elasticidad y su viscosidad.

El segundo cuestionamiento se refiere a la forma en que se tratan los materiales ferromagnéticos. En vez de introducir la histéresis como un fenómeno característico de los materiales ferromagnéticos, puede ser mejor empezar la enseñanza del ferromagnetismo con materiales magnéticos duros perfectos y materiales magnéticos blandos perfectos. Actualmente, las técnicas de manufactura de materiales permiten obtener muy buenos materiales magnéticos, tanto duros como blandos; por ende, en muchas aplicaciones técnicas, la histéresis ya no juega un papel trascendental.

La propuesta es introducir cuatro materiales magnéticamente diferentes. Sin embargo, éstas son idealizaciones, materiales más reales que son empleados técnicamente, son una buena aproximación de éstos materiales ideales.

El primer material magnéticamente perfecto es el material magnético duro ideal. Este es el material que se necesita para manufacturar imanes permanentes. En la fábrica, un imán permanente recibe la distribución deseada de magnetización y si es un buen imán, retiene esta magnetización independientemente de cualquier campo magnético externo al que es expuesto. La característica M-H de un material magnético duro ideal, se muestra en la siguiente figura:

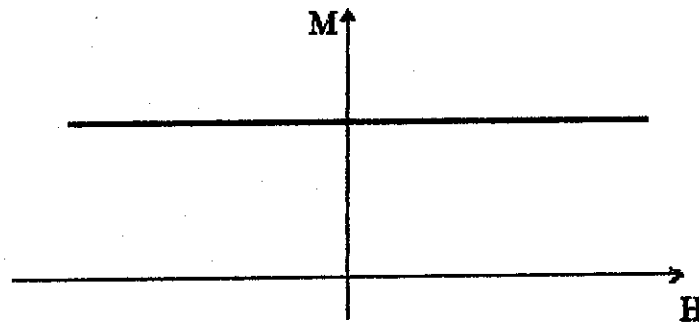


Figura No.III.3 En un material magnéticamente duro ideal, la magnetización M es independiente de la magnitud de la intensidad de campo magnético H .

Por supuesto, alguien puede cambiar la magnetización, por medio de una "fuerza bruta", aplicando un campo de muy alta intensidad. Esto sin embargo, no impide introducir un material cuya característica sea la mostrada en la figura anterior. Luego de esto, se puede proceder, exactamente, en la misma forma de verificación de cualquier otra ley en el campo de la física. Naturalmente, debe tenerse el cuidado de no exceder el dominio de la validez de

este comportamiento del material. Si el imán permanente no se expone a campos magnéticos excesivamente intensos, su magnetización permanecerá constante. Puede hacerse una analogía con la Ley de Hooke aplicada a un resorte, en donde si la fuerza que se le aplica al resorte no es excesivamente grande, esta ley se cumplirá siempre; sin embargo, existe un rango fuera del cual cualquier fuerza extra que sea aplicada al resorte, ya no estirará éste, una distancia proporcional a dicha fuerza. Es decir, un resorte, presenta característica de histéresis mecánica. Sin embargo, en los cursos de mecánica, nos limitamos a considerar resortes con un comportamiento dentro del rango elástico. La histéresis mecánica no se considera sino en temas de dislocaciones en cursos de física del estado sólido.

El segundo material magnético perfecto es el material magnético blando perfecto. El comportamiento de un material de este tipo, es el siguiente: cuando se coloca dentro de un campo magnético se magnetiza de tal manera que la intensidad de campo magnético H en su interior permanece cero. En un diagrama $M-H$, este material es caracterizado por una línea vertical paralela al eje M .

Mientras el material está siendo magnetizado, en su superficie se forman polos magnéticos. Los vectores de intensidad de campo fuera del material, inmediatamente, sobre su superficie son perpendiculares a tal superficie. Cualquier metal podría ser la contraparte electrostática de este material. Si un metal es colocado dentro de un campo eléctrico, existe desplazamiento de carga eléctrica en el material, de tal forma que la intensidad de campo eléctrico en su interior permanece cero.

Lo mismo que sucede con los materiales magnéticos duros, los materiales blandos magnéticamente, tienen un rango dentro del cual se conserva su característica ideal. En tanto que la intensidad de campo magnético no sea muy alta, existen materiales disponibles que se comportan como materiales magnéticos blandos perfectos. Un material real se satura y el campo magnético penetra en su interior solo si es expuesto a campos magnéticos demasiado fuertes.

Es comprensible que la histéresis juega un papel importante en libros de texto de años atrás, porque los materiales magnéticos que podían manufacturarse, estaban lejos de presentar características ideales. Sin embargo, con las técnicas de manufactura actuales, se puede justificar completamente la introducción de materiales magnéticos ideales en el curso de electromagnetismo.

Por supuesto, con esto no se sugiere la eliminación del tema de la histéresis en el contenido del curso de electromagnetismo. No debe olvidarse que el fenómeno de la histéresis tiene importantes aplicaciones técnicas: el funcionamiento de todos los dispositivos

de almacenaje de datos está basado en este efecto. A pesar de todo, es conceptualmente fácil introducir, primero, los casos simples y, entonces, tratar la histéresis. Como en el caso de la mecánica cuando se tratan problemas donde se desprecia la masa del resorte y sólo después de esto pueden considerarse resortes con masa distinta de cero. O como en el caso de la termodinámica, que primero se discute el comportamiento de un gas ideal y, luego, las características de un gas real.

Considerando las propiedades magnéticas, se pueden identificar dos tipos más de materiales ideales. Uno de ellos es, aquel material que es magnéticamente inerte. Es decir, un material que sea no magnético y no magnetizable, como el cobre, vidrio, madera y plásticos. En una primera aproximación, se puede despreciar efectos de paramagnetismo y diamagnetismo.

Finalmente, el cuarto tipo de material ideal son los superconductores, que regularmente son referidos como los materiales **diamagnéticos perfectos**. Estos diamagnéticos perfectos tienen algo en común con los materiales magnéticos blandos: no permiten que un campo magnético penetre en su interior. Sin embargo, la forma en que lo hace cada uno de ellos es diferente. Mientras que el material magnético blando forma polos magnéticos en su superficie, los superconductores forman corrientes eléctricas en su superficie. Cerca de la superficie de un superconductor, el vector de intensidad de campo magnético H es paralelo a tal superficie, en tanto que no haya polos magnéticos en la superficie en la cual se conformen fuentes para la intensidad de campo magnético.

En la siguiente tabla se resume las características de los cuatro tipos de materiales mencionados:

| | |
|----------------------------|--|
| Material No Magnético: | el campo penetra como si el material no existiese. |
| Material Magnético Duro: | la magnetización es inalterable; un campo externo penetra como si el material no existiese. |
| Material Magnético Blando: | tiene un campo externo; forma polos en su superficie; el vector H es perpendicular a su superficie. |
| Superconductores: | tiene un campo magnético externo; forma corrientes eléctricas en su superficie; el vector H es paralelo a su superficie. |

III.1.2 INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO CONTRA INDUCCION MAGNÉTICA

Para describir el tema de magnetismo, se usan tres cantidades vectoriales diferentes: la inducción magnética B , la intensidad de campo magnético H y la magnetización M . Estas cantidades están relacionadas por:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

La validez de esta relación significa que sólo dos de las tres cantidades B , H , y M son independientes, y una cantidad puede ser derivada de las otras dos.

Mientras que en los textos clásicos de James Clerck Maxwell y J.J. Thomson los vectores de campo B y H son tratados por igual, actualmente, en los libros de texto se enfatiza mucho más en el campo B , ya que se considera que éste es más fundamental. Ciertamente, es mejor usar B cuando se tratan temas de electrodinámica a escala microscópica. Además, es B la responsable de la fuerza de Lorentz y, por cierto, que el fenómeno de la inducción magnética es seguramente más comprensible cuando se trata en términos de B en lugar de H . Sin embargo, la preferencia de B sobre H tiene consecuencias en que, se tienen ventajas de operación al utilizar H . Para reconocer las ventajas de operación de H en lugar de B , es suficiente observar las razones de por qué es muy fácil operar con E en electrostática. El problema de la siguiente figura pertenece al tipo de problemas que pueden ser resueltos, cualitativamente, por aplicación de unas pocas reglas.

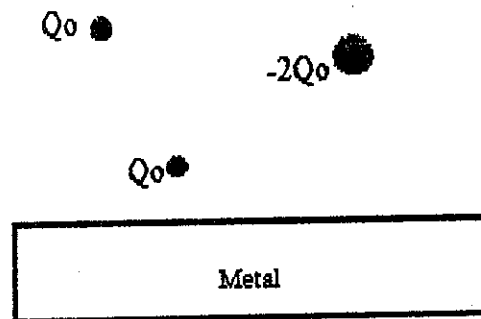


Figura No.III.4 ¿Cuál es la forma de las líneas de campo eléctrico?

En este problema, se presenta un arreglo de distribuciones de carga y un conductor eléctrico. Indiscutiblemente, este problema puede ser resuelto por aplicación de una de las ecuaciones de Maxwell:

$$\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0 \quad (2)$$

Normalmente, un estudiante no va al origen de las ecuaciones de Maxwell. En lugar de eso, él o ella opera una serie de reglas que son fáciles de manipular. Estas reglas representan una consecuencia de la ecuación (2) y del hecho que la carga eléctrica puede moverse libremente en conductores eléctricos. La siguiente lista se refiere a las reglas mencionadas:

- 1) las líneas de campo eléctrico empiezan en una carga positiva y terminan en una carga negativa. El número de líneas de campo que empiezan o terminan en una carga es proporcional al valor absoluto de la carga,
- 2) las líneas de campo eléctrico nunca se cruzan,
- 3) en el vacío, la dirección de un campo eléctrico no cambia abruptamente,
- 4) dentro de un conductor eléctrico no existen líneas de campo eléctrico,
- 5) en la parte externa de la superficie de un conductor, las líneas de campo son perpendiculares a dicha superficie.

Existen algunas reglas más, si se considera un material dieléctrico. Sin embargo, no se considera este caso.

Ahora, para las líneas de campo magnético, es decir, las líneas de la intensidad de campo magnético \mathbf{H} , es válida una serie de reglas, que son análogas a las anteriormente mencionadas reglas del campo eléctrico. De nuevo se empieza con una de las ecuaciones de Maxwell:

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

usando la ecuación (1), se tiene:

$$\text{div } \mathbf{H} = -\text{div } \mathbf{M} \quad (3)$$

e introduciendo una densidad de carga de polo magnético, ρ_m :

$$\rho_m = -\text{div } \mathbf{M}$$

la ecuación (3) puede ser escrita como:

$$\text{div } \mathbf{H} = \rho_m/\mu_0 \quad (4)$$

lo cual tiene la misma estructura matemática que la Ec. (2). ρ_m describe, cuantitativamente, la distribución de la carga de polo magnético. Las reglas para las líneas de campo magnético se sigue de la Ec. (4) y del hecho que en los materiales magnéticos blandos los polos magnéticos pueden moverse libremente en ellos, como la carga eléctrica en los conductores metálicos:

1') las líneas de campo magnético empiezan en un polo positivo magnético (*norte*) y terminan en un polo negativo magnético (*sud*). El número de líneas que empiezan o terminan en un polo magnético es proporcional al valor absoluto de la carga magnética de dicho polo,

2') las líneas de campo magnético nunca se cruzan entre sí,

3') en el vacío, la dirección de una línea de campo magnético no cambia abruptamente,

4') dentro del material magnético blando, no existen líneas de campo magnético,

5') en la parte externa de la superficie de un material magnético blando, las líneas de campo son perpendiculares a dicha superficie.

Comparando las Ecs. (2) y (4) y/o las reglas 1) a 5) con las reglas 1') a 5') puede notarse que la solución del problema que se muestra a continuación es similar al caso de las cargas eléctricas cerca del conductor metálico que se mostró anteriormente.

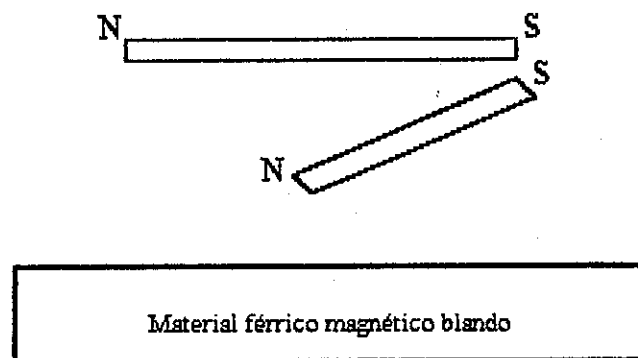


Figura No.III.5 ¿Cuál es la forma de las líneas de Campo Magnético?

Con esto se muestra que la solución de un problema de magnetostática es muy similar a un problema de electrostática.

Si el interés fuera sobre las líneas del campo B , éstas pueden ser obtenidas de nuevo de manera cuantitativa combinando la distribución del campo H y la magnetización, la cual está dada o es fácilmente obtenible en éste problema.

¿Cuál es la razón por la que los estudiantes tienen problemas al tratar de dibujar las líneas del campo B ? ¿Existirán reglas análogas para las líneas de campo B ? Por supuesto que sí las hay. Tres de las reglas mencionadas para el campo H son válidas para el campo B : 2'), 3') y 5'). La regla 1') es reemplazada por la siguiente:

1'') Las líneas del campo B son siempre cerradas.

No hay regla correspondiente a la regla 4').

Sin embargo, la regla 1'') es muy poco útil para la construcción de las líneas del campo B , que las reglas 1') y 4') para la construcción de las líneas de H . Mientras que las reglas 1') y 4') relacionan las líneas de campo a los polos magnéticos, la regla 1'') no lo hace con divergencia de la magnetización.

Por otro lado, la analogía entre E y H es ventajoso en otros dominios del electromagnetismo. Por ejemplo, para el cálculo de la distribución del vector de Poynting y la distribución de la tensión mecánica. Esto es limitado, por supuesto, por el hecho de que en la naturaleza no existen cargas magnéticas aisladas (por lo menos hasta hoy en día, no se han descubierto los monopolos magnéticos). Como consecuencia, no existen corrientes magnéticas reales.

Finalmente, se agregan dos reglas más para el campo magnético, 6') y 7') las cuales no tienen contraparte eléctrica. Las reglas 4') y 5') sólo son válidas para materiales magnéticos blandos, las reglas 6') y 7') son para materiales superconductores.

6') Dentro de un material superconductor no existen líneas de campo magnético.

7') En la parte externa de la superficie de un superconductor, las líneas de campo son paralelas a la misma.

III.2 UN MÉTODO DIRECTO PARA VISUALIZAR LA FASE DE TRANSICIÓN FERROMAGNÉTICA

La mayoría de estudiantes aprenden a cerca de la transición ferromagnética en el curso de electromagnetismo; pero, no se tienen ejemplos claros de esto en la vida diaria. Un buen ejemplo que puede ser demostrado, es la transformación de un material ferromagnético en un material paramagnético a la temperatura crítica (T_c). Con un simple circuito y una inductancia comercial, el mencionado anillo "Rowland" es un espécimen, cuyo proceso de la fase de transición puede ser observado directamente en un osciloscopio y de esta forma extraer el exponente crítico de transición ferromagnética.

III.2.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Cuando se aplica algún campo magnético a un material ferromagnético que se encuentre a una temperatura inferior de T_c , temperatura crítica o temperatura de Curie, puede ser considerado como un enorme número de pequeños magnetos localizados aleatoriamente en diferentes dominios. Cuando se aplica un campo magnético externo, tales pequeños magnetos

son forzados a alinearse en un orden específico y, entonces, una magnetización neta, M , existe. La magnetización se incrementa con el incremento del campo magnético externo hasta que la saturación ocurra; pero, si se remueve el campo externo, la magnetización no retorna a cero. Como consecuencia, resulta una curva de histéresis. Con un aumento de temperatura, la energía térmica distorciona el ordenamiento de los pequeños magnetos y la magnetización por su puesto, decrece. Cuando la temperatura se aproxima a la temperatura crítica T_c , M cae a cero. La observación de $M(T)$ solo por debajo de T_c es muy bien descrita por la siguiente ley: $M \propto (T_c - T)^\beta$, donde β es un exponente crítico, cuyos valores típicos están entre 0.33 y 0.37.

III.2.2 CONSTRUCCIÓN DEL EXPERIMENTO Y RESULTADOS

La construcción del experimento se muestra en forma diagramática en la siguiente figura:

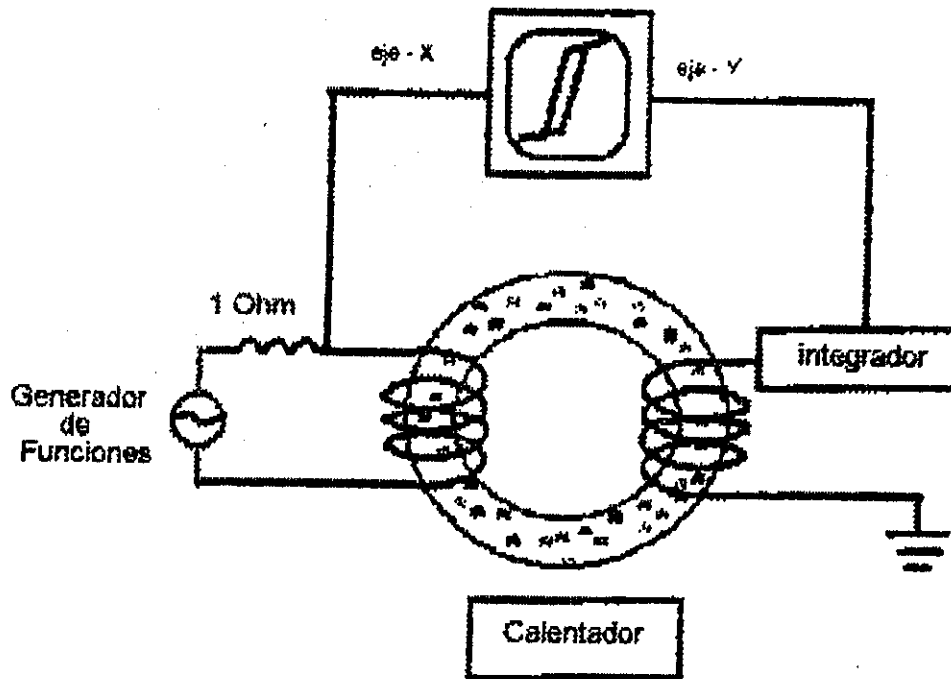


Figura No.III.6 Construcción del experimento para observar la fase de transición ferromagnética

Este espécimen es una económica inductancia comercial hecha de polvo ferromagnético. Un generador de funciones produce una señal de AC, que es un campo eléctrico que induce un flujo magnético alternativo, el cual genera una fem inducida en una bobina secundaria. Esto puede ser expresado por la ley de Faraday:

$$\varepsilon = -N_2(d\phi_B/dt) \text{ o después de integrar:}$$

$\int \varepsilon dt = -N_2 \int d\phi_B$, donde N_2 es el número de vueltas de la bobina secundaria, ϕ_B es el flujo magnético y T es el periodo de la señal. Por lo que se necesita integrar la fem para calcular el cambio de flujo magnético durante un ciclo. Se puede observar la histéresis en el osciloscopio en el modo x-y. En la siguiente figura se muestra un integrador simple con buena respuesta de frecuencia entre 10 Hz y 10 kHz.

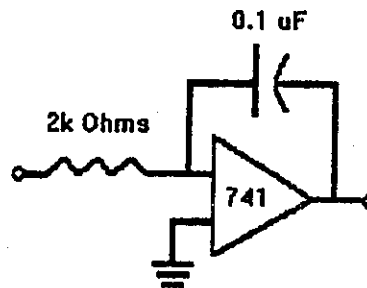


Figura No.III7 Circuito simple para la integración de la fem inducida

Una frecuencia alternante de cerca de 500 Hz se aplica para inducir el campo magnético. La muestra se calienta con una estufa eléctrica y su temperatura medida con un termómetro químico. Se puede observar que el área del anillo de histéresis decrece conforme se incrementa la temperatura y se desvanece cuando se aproxima a $T_c \approx 135^\circ \text{C}$. A continuación se muestran ocho figuras a diferente temperatura las cuales muestran el proceso de transición.

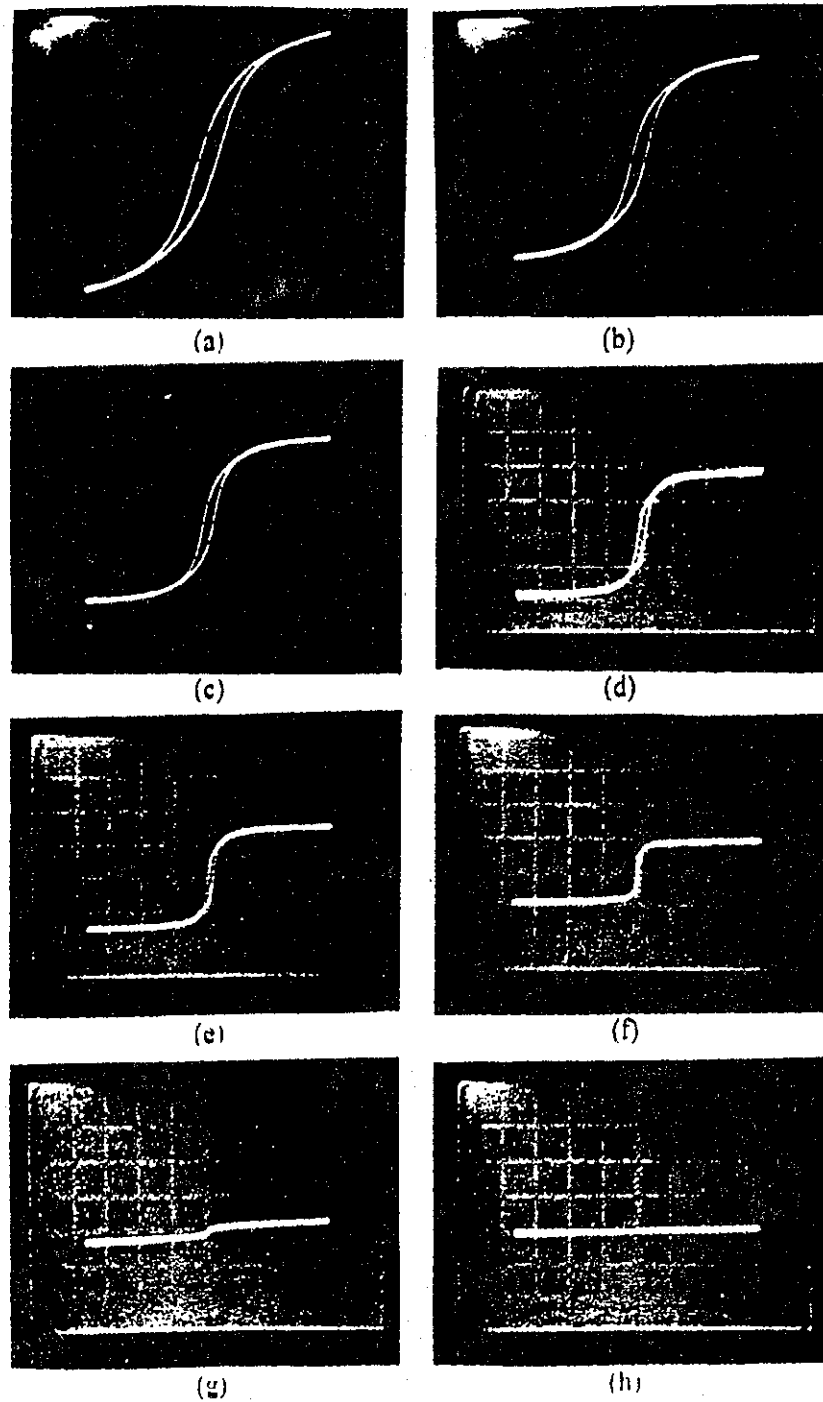


Figura No.III.8 Curvas de Histéresis para el espécimen utilizado para el experimento de visualización de la fase de transición ferromagnética. Con $T_c = 135^\circ \text{C}$. De (a) a (h), $T = 27, 77, 98, 115, 121, 131, 133,$ y 135°C , respectivamente.

Se ha descrito un marcable método directo para observar la transición ferromagnética, en el laboratorio de introducción a la teoría electromagnética. Además, se obtiene también la curva M-T y también el exponente crítico de transición ferromagnética. En todo se necesita medir la temperatura y la magnetización, la cual es proporcional a la fem integrada. Se puede enfatizar en que el área del anillo de histéresis decrece, dramáticamente, conforme la temperatura se acerca a T_c ; por lo tanto, es posible calentar hasta, aproximadamente, T_c primero que nada y, entonces, tomar medidas durante el período de enfriamiento. Para una mejor exactitud, es siempre necesario ajustar la escala del eje x del osciloscopio.

III.3 LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Antes de abordar el tema, es importante plantearse un par de preguntas que guiarán, al desarrollo de la misma. Estas preguntas son: ¿Cuál es la característica para la transición al estado de superconductividad? ¿Cómo se describe el estado de superconductividad?

Para describir el efecto Meissner, Fritz London formuló algunas ecuaciones para complementar las ecuaciones de Maxwell. En su libro de Superfluidos se describe la electrodinámica de superconductores. Taylor por su parte, en su Introducción general a la Superconductividad, describe un circuito con un anillo superconductor. Ahora, la pregunta es ¿Cuán persistente es la corriente en un anillo superconductor? además ¿Se podrá estimar la resistencia de tal anillo?

Los materiales superconductores son de interés para determinadas aplicaciones, como los magnetos utilizados para la producción de un haz concentrado de electrones o los magnetos en los trenes de levitación magnética, entre otras.

III.3.1 ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS SUPERCONDUCTORES Y SU CORRELACIÓN TERMODINÁMICA

El descubrimiento de la superconductividad y las condiciones cuando esto es posible, permitió obtener condiciones en las cuales se puede lograr lo que se llama "*el estado de superconductividad pura*". Hasta antes de este descubrimiento, todos los experimentos estaban opacados por la complejidad del fenómeno, el cual indica la presencia de un estado de desequilibrio en el aspecto termodinámico. El resultado de las observaciones son difíciles de reproducir, pues, éstos dependen de la historia previa del objeto en cuestión y en el mejor de los casos, proporcionan una buena cantidad de hechos de un pequeño significado teórico. La evolución del concepto del *estado de superconductividad pura*, fué el paso esencial antes de haber sido posible aplicar a la superconductividad, los métodos generales y conceptos de termodinámica y de electrodinámica.

Kamerlingh Onnes, fué el primero en lograr el helio líquido en 1,908 y, entonces, fué posible alcanzar una temperatura de solo unos pocos grados arriba del cero absoluto; aplicando esta nueva técnica a la medición de la resistencia eléctrica de varios metales a la temperatura del helio líquido. Onnes descubrió (1911) sorpresivamente, que la resistencia del mercurio cae abruptamente a un valor inmensurablemente pequeño cuando la temperatura llega por debajo de cierto valor, el cual él determinó que era, aproximadamente 4.2, Kelvin, que fué

llamado "temperatura de transición" del mercurio. En la siguiente figura se muestra la resistencia del mercurio como una función de la temperatura.

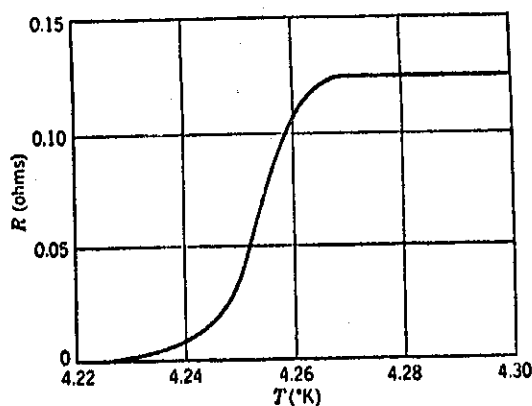


Figura No.III.9 La resistencia del mercurio como una función de la temperatura.

Hasta la fecha, un gran número de metales puros (aproximadamente 20) y muchas aleaciones, se ha descubierto que presentan las mismas propiedades del mercurio.

Además de lo anteriormente mencionado, Kamerlingh Onnes descubrió que éste fenómeno, al cual llamó superconductividad, desaparece cuando se aplica un campo magnético suficientemente fuerte. Él observó una transición muy abrupta para una intensidad de campo magnético bien definida, cuando el campo es orientado paralelo al eje del conductor y una corriente muy débil se usa para la medición de la resistencia. El campo necesario para anular la superconductividad, que es llamado campo crítico o de umbral, depende de la temperatura y desaparece en la temperatura de transición con una pendiente finita. La curva representando el campo crítico H_c es una función de la temperatura y ha sido medida para varios superconductores, como se muestra en la siguiente figura.

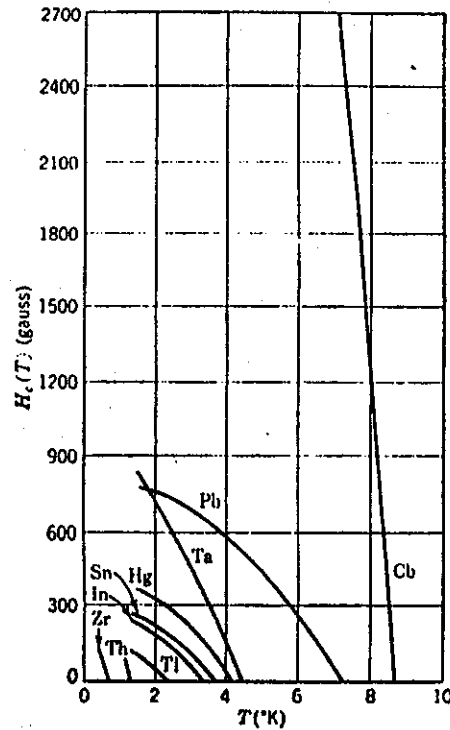


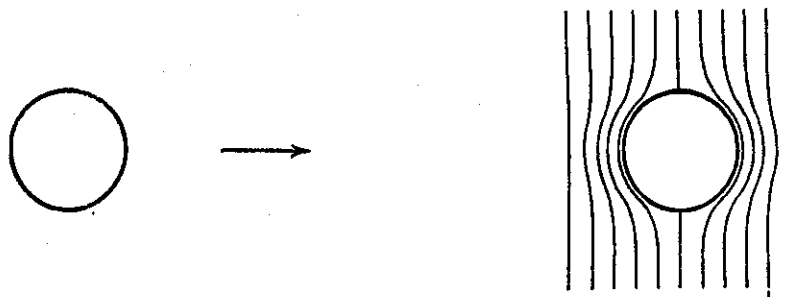
Figura No.III 10 Curvas de intensidad de campo de umbral para varios superconductores.

La resistencia de un superconductor es extremadamente pequeña y ha sido demostrado por varios experimentos. Particularmente conocido es el famoso experimento de Kamerling Onnes y Tuyn, en el cual una corriente "permanente" o persistente es generada por inducción en una esfera que está suspendida por una cuerda de torsión en el centro de un anillo superconductor, el cual también tiene una corriente persistente. Los dos sistemas se comportan como un imán permanente; la torsión no cambia en tanto que la temperatura permanece por debajo de la temperatura de transición por varias horas.

La superconductividad no puede ser interpretada satisfactoriamente, como el estado aquel en que la *conductividad* σ tiene un valor infinito. Ya que en este caso, de la ley de Ohm se tiene $\sigma E = J$, entonces, se sigue de la ley de inducción, que es imposible tener algún cambio de las líneas de la inducción magnética B . Ya que en el caso limite $\sigma \rightarrow \infty$, la ecuación de Maxwell $\nabla \times E = -[\partial B / \partial t] / c$ y la ley de Ohm $E = J / \sigma$, evidentemente, implican que $\partial B / \partial t = 0$ o que B es constante en el tiempo. Significa que, si un conductor perfecto, está sujeto a un campo magnético externo variante en el tiempo, se inducirán corrientes superficiales cuando el campo magnético dentro de dicho material, sea constante. El campo

externo será anulado por estas corrientes porque las líneas de fuerza no penetran el cuerpo del conductor. En tanto que no se tenga resistencia, estas corrientes superficiales no desaparecerán y, entonces, el campo dentro del metal permanece constante en el tiempo. De acuerdo con esto, se concluye que el flujo magnético estará presente en el superconductor en el instante de su última transición hacia el estado de superconductividad y permanecerá hasta que la temperatura alcance de nuevo un valor arriba del punto de transición.

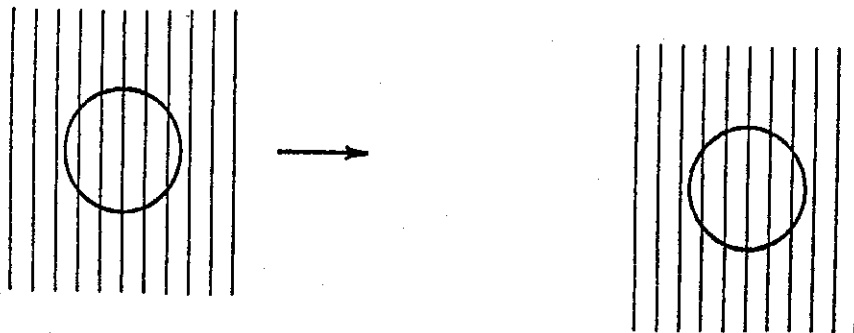
Esta interpretación se amplía a, que el estado actual de algún superconductor depende de su *historia anterior*. Lo anterior se ilustra en los dos casos de la siguiente figura.



Caso I.

El espécimen es primeramente enfriado por debajo de su temperatura de transición

y, luego, es puesto en un campo magnético.



Caso II.

El espécimen es puesto en un campo magnético, mientras permanece en su estado normal

y, seguidamente, es enfriado por debajo de su temperatura de transición.

Figura No. III 11

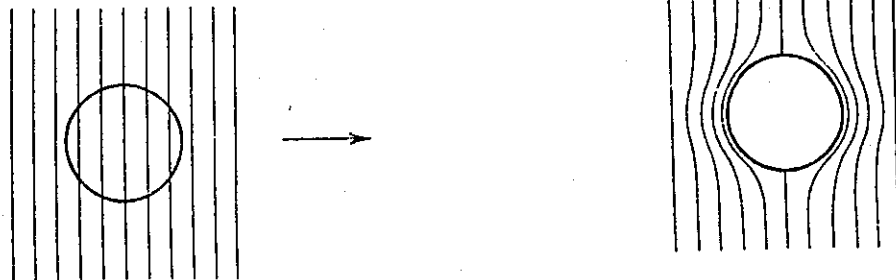
Este comportamiento aparece en todos los experimentos donde se asume una conductividad infinita. Pero esta panorámica no es muy satisfactoria. Si muchos o aunque un número infinito de estados sea posible lograr bajo las mismas condiciones externas, éstos no podrían estar todos en equilibrio térmico.

Estos efectos ocurren, particularmente, a bajas temperaturas; los cristales y la glicerina superenfriada son buenos ejemplos, en los cuales los estados de desequilibrio son de mucha estabilidad. Pero, en estos casos, es la *carencia de estabilidad* de las moléculas en esta enfriada estructura que impide el establecimiento de un verdadero estado de equilibrio térmico.

En el caso del superconductor, sin embargo, parece extremadamente dificultosa, la posibilidad de imaginar que aquí los electrones que son supuestos con una movilidad particular, podrían sin embargo mantener el sistema en semejante incierto estado de desequilibrio. Aunque ya se mencionó que $\sigma \rightarrow \infty$ implica $\partial B/\partial t = 0$, puede parecer que esto quizá sobreesfuerce la teoría de Maxwell donde no se ha utilizado nunca, antes. Algunos procesos secundarios están siempre presentes, donde podrían causar transiciones tales como un estado inestable en estados cercanos de pequeñas energías libres y, eventualmente, lo llevan al equilibrio con sus alrededores.

De hecho, antes de 1933 nadie había realizado mediciones del campo a un superconductor en un campo magnético. El tema pareciera estar completamente establecido con la teoría del conductor perfecto, lo cual se confirma con los experimentos de corriente persistente.

La gran sorpresa se dió cuando Meissner y Ochsenfeld (1933), anunciaron sus resultados experimentales, que contrastan con el comportamiento visto anteriormente. Ellos enfriaron un monocristal de estaño en un campo magnético y encontraron que *la intensidad de campo magnético fuera del metal es variado, súbitamente*. Esto fué como si las líneas de fuerza fueran rechazadas por el superconductor, cuando el espécimen pasa por el punto de transición. La componente normal del campo en la superficie del superconductor se hace cero, indicando que *la inducción magnética B desaparece dentro del superconductor*. En la siguiente figura se muestra, con alguna simplificación, el resultado obtenido por Meissner.



El campo magnético es aplicado, mientras el espécimen se encuentra en su estado normal.

Cuando el espécimen es enfriado por debajo de su temperatura de transición, el campo desaparece dentro del espécimen.

Figura No. III 12

Este comportamiento es completamente diferente de lo que podría ser esperado si esto fuera solamente una transición en un estado de conductividad infinita (Fig. No. III 11 caso II). El resultado es exactamente el mismo que el del caso I (Fig. No. III 11). Parece como si el estado final es *independiente* de si el material se enfría primero y entonces el campo magnético es aplicado o viceversa. En cualquiera de los dos casos, se obtiene la misma distribución de campo. El comportamiento del superconductor no es tan simple como el del conductor perfecto, en el cual se implica solamente $\partial B/\partial t = 0$, pero, en un diamagnético perfecto $B = 0$. Ocasionalmente, este resultado también es descrito por el hecho de que la permeabilidad magnética $\mu \rightarrow 0$. Sin embargo, ni $\mu \rightarrow 0$ ni $\sigma \rightarrow 0$ proporcionan una descripción satisfactoria de la transición al estado de superconductividad.

¿Cómo pudo este suceso que es comparativamente simple permanecer incomprendible por muchos años? Esto es fácil de ver, pues, la pequeña impureza o inhomogeneidad del material puede ser suficiente para evitar el apareamiento del efecto Meissner. El hecho de que el flujo magnético tenga que ser encontrado bajo condiciones "no ideales", parece ser generalmente relacionado con la presencia o la formación de inclusiones no superconductoras. Tampoco la inhomogeneidad del material (estructura policristalina) provee la clave de, en cuál parte es presionado el campo cuando en el ralajamiento del metal pasa a ser superconductor o las líneas del campo magnético están concentradas en cierta región del superconductor cuando el valor de umbral es alcanzado y la superconductividad anulada. Tales líneas magnéticas son, por lo tanto, un poco mejor consideradas como un espécimen con ausencia de inclusiones no superconductoras y no como el propio metal superconductor, como la idea original. **La región de superconductividad pura nunca contiene flujo magnético.**

Por supuesto, esta interpretación va un poco más allá de los hechos. De todos modos, esto presupone una gran simplificación de la situación y, por supuesto, esto implica un gran

número de consecuencias que pueden ser medidas. Es, por lo tanto, de interés, considerar este mérito con algo de cuidado.

De acuerdo con este concepto, los campos a baja temperatura, *no duran mucho tiempo* como característica elemental. Son, más bien, un fenómeno complejo que puede ser reducido a algo más elemental. La característica *elemental* de lo que es llamado *el estado de superconductividad pura*, es más simple: De acuerdo con el descubrimiento de Meissner, como se interpreta, la transición del estado normal al estado de superconductividad pura en un campo magnético es, en principio, *un proceso reversible* y, entonces, la inducción magnética obtenida es *siempre cero*, sin considerar la manera en que el espécimen alcanza el estado de superconductividad pura. Los campos a baja temperatura que son observados actualmente, son atribuidos exclusivamente a la presencia de la formación de una estructura porosa o esponjosa, de múltiples regiones superconductoras conectadas, enlazando los flujos. De acuerdo con el comportamiento de los flujos a baja temperatura, se concluye que esto *no* es una propiedad elemental de elementos de volumen pequeños del propio superconductor, sino que, es mejor relacionado con su estructura macroscópica. En la teoría del conductor perfecto, estos campos podrían ser interpretados como estados de desequilibrio, en elementos de volumen infinitesimales, pero, esto no siempre es satisfactorio. El experimento original de Meissner, no mostró un "efecto Meissner ideal". En el mejor de los casos, en la obtención de metales "espectroscópicamente puros" hay aún una inducción dentro del material, del orden del 1 o 2 por ciento del campo de umbral. En general, las aleaciones muestran un efecto Meissner muy puro. Pero los compuestos intermetálicos, tales como Au_2Bi y CuS , cuando son preparados muy cuidadosamente, tienen un comportamiento como de metal puro. Por otro lado, existen algunos metales puros, como el tantalio y el colombio, que han sido encontrados, como algunas aleaciones, que no muestran efecto Meissner alguno. En el presente no está claro todavía cuáles son las condiciones particulares que son responsables del punto de partida de idealidad en estos casos. Posiblemente, los gases disueltos o las tensiones internas sean las causas. Aunque no ha sido posible observar un efecto Meissner al 100 por ciento, se tomará, por lo tanto, que estas desviaciones del comportamiento "ideal", son atribuidas a la presencia de una especie de mezcla de dos fases, una de las cuales es el estado de superconductividad pura ($B = 0, E = 0$) y la otra, el estado normal.

Además, la pureza y homogeneidad del material y la forma del espécimen, son de importancia para el establecimiento del estado de superconductividad pura. Una forma "ideal" sería un cilindro infinitamente largo, paralelo al campo externo, que es un cuerpo de coeficiente de desmagnetización cero. Alguna otra forma presupone una reacción en el campo

externo cuando el espécimen es magnetizado, lo cual puede conducir de nuevo a una transición parcial al estado normal, ya que existen *estados intermedios*.

III.4 EXPERIMENTO CON UN ANILLO SUPERCONDUCTOR A LA TEMPERATURA DEL NITRÓGENO LÍQUIDO

Este experimento está diseñado para estudiar las corrientes permanentes en un anillo de material comercialmente obtenible, a temperatura del nitrógeno líquido. Las corrientes son fácilmente detectadas con un probador Hall análogo estándar. De observaciones extendidas hasta un período de 3 semanas, un límite superior en la posible resistencia del anillo es de alrededor de $2 \times 10^{-16} \Omega$. Para los anillos estudiados, las corrientes inducidas alcanzan valores de 2 A, cuando el flujo variante aplicado se incrementa. Este experimento provee un interesante suplemento para los tópicos que se tratan en electromagnetismo. Los efectos son sorprendentes y fácilmente discutibles a un nivel introductorio. Por ejemplo, podrían analizarse y discutirse las corrientes inducidas que se presentarían en el anillo por efecto del campo de la tierra.

Tomando en cuenta el experimento del anillo superconductor de H. Kamerlingh Onnes y con el descubrimiento de la nueva alta temperatura crítica de superconducción, el experimento se puede adaptar para efectos de enseñanza. El efecto de "corriente persistente" es seguramente el mejor indicador de la conductividad perfecta (un hecho que puede ser bien comprensible para el nivel de los estudiantes de los cursos de electromagnetismo). Se usan, además, efectos de otros conceptos de electromagnetismo y se enfatiza en principios fundamentales tales como la Ley de inducción de Faraday y la ley de Lenz, conductividad, inductancia y la ley de Biot-Savart. Al mismo tiempo, se incentiva el interés de tratar con materiales de determinadas características.

La filosofía es proveer la idea de que es simple y, generalmente, posible de realizarse. El "anillo" es posible de obtenerse, comercialmente, pues se trata del cerámico "123" ($Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$). Las dimensiones del anillo son: 0.82plg diámetro externo y 0.26plg diámetro interno, estos son los requerimientos prácticos. De aquí que el ancho radial del anillo será más o menos igual al diámetro interno. Esto, con el fin de realizar las mediciones de la corriente en el anillo con la mayor exactitud posible. Una cuestión interesante es que la magnitud de la corriente persistente inducida, es tal como se espera con base en el flujo variante aplicado y la inductancia propia del anillo.

El nivel teórico requerido para este experimento es en el rango de un trato introductorio de electricidad y magnetismo que, como mínimo, lo tienen los estudiantes de Teoría Electromagnética.

III.4.1 OBSERVACIONES CUALITATIVAS

El arreglo experimental se esboza en la siguiente figura:

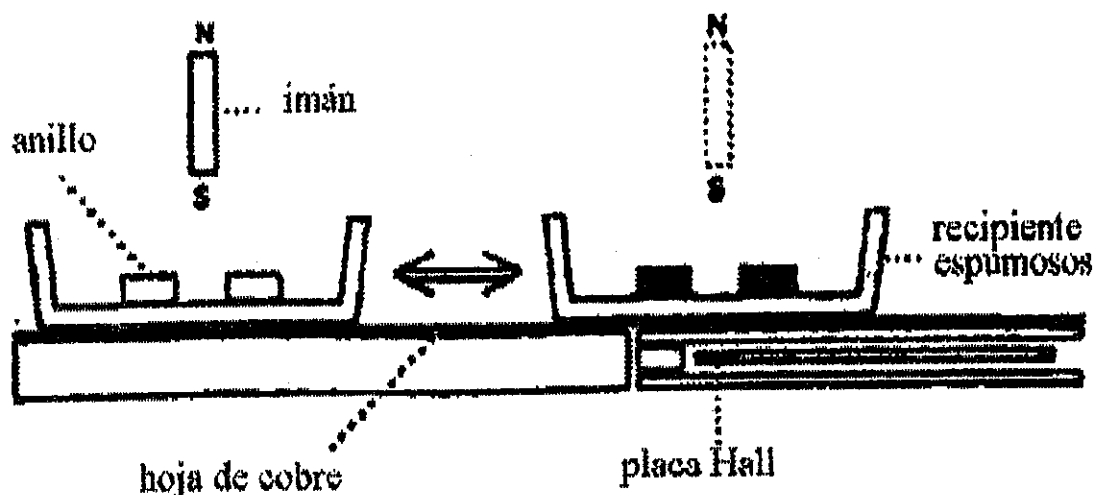


Figura No. III.13

Las corrientes del anillo se detectan con un probador Hall "gaussmetro". Esto es importante para que el estudiante vaya familiarizándose con el uso y teoría de este instrumento para algunos otros experimentos elementales. En particular, el estudiante necesita comprender que el "probador Hall" responde a la componente del campo magnético que es *perpendicular* a la "placa Hall", a la componente vertical del campo en la parte activa del probador. El anillo puede ser colocado en cualquiera de dos posiciones, sobre la placa (como se muestra en la parte derecha de la figura anterior) o desplazado unas 3 plg. (como se muestra en la parte izquierda de la figura). Una delgada (0.005plg) hoja de cobre es colocada debajo del recipiente para reducir remolinos en el cero del probador Hall, debido al aire frío del recipiente. Moviendo el recipiente como se muestra, es importante para apreciar el cambio en la lectura del probador, en la parte que corresponde al campo que se establece por el anillo.

Si se estudiara la cuestión del signo, la polaridad del instrumento debe ser cuidadosamente puesta y discutida. Por ejemplo, el instrumento puede ser colocado de tal manera que la lectura aumente con un aumento del campo en la placa Hall. Como un preludio, esto es demostrado (primero removiendo el anillo y el recipiente conjuntamente) mostrando que un aumento en la lectura de la escala resulta cuando el polo Sur de una pequeña barra magnética de Alnico es sostenida en la posición mostrada directamente sobre la placa.

El magneto es ahora sostenido sobre el recipiente (en su posición en la parte izquierda) entonces, se consigue un campo de, aproximadamente, 10-G en el anillo. El nitrógeno líquido se vierte en el recipiente. Cuando los elementos se tienen de esta forma, los estudiantes deberán recordar que aún existe un flujo a través del agujero. La barra magnética es ahora removida. En estas circunstancias el estudiante nota que debido a la conductividad perfecta, no puede existir un campo E circunferencial en el anillo durante el tiempo en que el magneto se gira. Por tanto, de las ecuaciones de Faraday y Maxwell, se logrará una corriente en el anillo cuando el flujo total a través del agujero llegue a ser constante. De aquí que cuando el magneto está alejado, el sentido de esta corriente debe ser tal que provea un *aumento* en el flujo. Para demostrar esto, el recipiente es deslizado sobre la placa Hall (con el instrumento puesto en el rango de 1 o 3-G). Un cambio verdadero de aumento en la escala, es lo que se encuentra. Si ahora el anillo es físicamente levantado (usando dos piezas de hilo fino previamente atados) se aprecia una disminución en la escala. Estos hechos enfatizan en que el anillo se comporta como una espira portando una corriente.

El experimento de remoción del magneto puede ser, por supuesto, discutido en términos de la ley de Lenz: la oposición al cambio del flujo aplicado, significa que la "inducción" debe ser tal que la corriente en el anillo provea un flujo igual al flujo original, pero, de signo opuesto. La idea de oposición también puede ser demostrada por una técnica diferente: la barra magnética es puesta directamente sobre la placa y el anillo, enfriados, remotamente. La lectura del probador entonces disminuye cuando el anillo es deslizado entre la barra magnética y la placa. La segunda técnica es menos resaltante que la primera, ya que requiere la utilización del gaussmetro en un superior y menos sensible rango.

Aún es posible otra demostración tal como sigue: con un material no magnético cerca, el anillo es enfriado mientras está más o menos a 3plg. de la placa. Los estudiantes no se sorprenderán al ver que no sucede nada cuando el anillo es deslizado sobre el medidor. Sin embargo, si el anillo es levantado se aprecia una lectura en tal medidor. Podría realizarse este mismo experimento debido a la inducción producida, considerando el anillo en el campo magnético de la tierra.

Debe tenerse algo de cuidado en el manejo del anillo. Debe evitarse un contacto con los dedos de la mano. El anillo puede ser fácilmente manipulado toda vez que las piezas de hilo han sido atadas correctamente. Algo de humedad en el anillo durante el tiempo de enfriamiento puede resultar en una explosión. Después del uso, el anillo debe ser secado y puesto en una pequeña caja hermética conteniendo un deshumidificador adecuado. Un buen procedimiento es pintar el anillo con alguna capa de barniz (como el GE No. 7031). Esto reduce la acumulación de suciedad en el material cuando permanece en el recipiente.

III.4.2 LA CORRIENTE PERSISTENTE O PERMANENTE

Toda vez que el anillo es excitado, es fácil lograr el trazo de la magnitud de la corriente del anillo (con un factor de proporcionalidad) por un monitoreo del campo B_p producido en la placa Hall. Haciendo esto en un periodo largo de tiempo, se forma una pequeña capa de espuma (nitrógeno líquido) como se muestra en la siguiente figura.

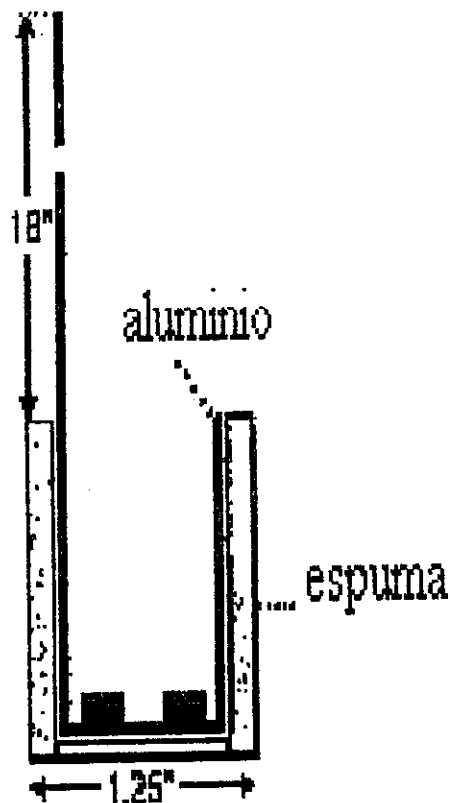


Figura No. III.14

Esto mantiene el anillo con suficiente nitrógeno líquido durante, aproximadamente, 10 minutos en la mesa de trabajo. El interior del recipiente (aluminio o latón) quedará hermetizado por el líquido. El recubrimiento es realizado por el lado de afuera con una capa espumosa de nitrógeno líquido. El diámetro exterior de 1.25plg. es suficientemente pequeño, de tal manera que es fácil adaptarse para verter el nitrógeno líquido desde el recipiente de almacenaje; el mango debe estar hecho de una varilla de 1/16 plg. de fibra de vidrio epóxico (G10) con una longitud suficiente para alcanzar sólo la parte inferior de la tapa del recipiente que contiene el nitrógeno líquido. Con este arreglo es posible mantener dos recipientes con anillos dentro del mismo "depósito" de nitrógeno líquido por largos períodos de tiempo.

Los resultados para dos anillos diferentes se muestran en la siguiente figura:

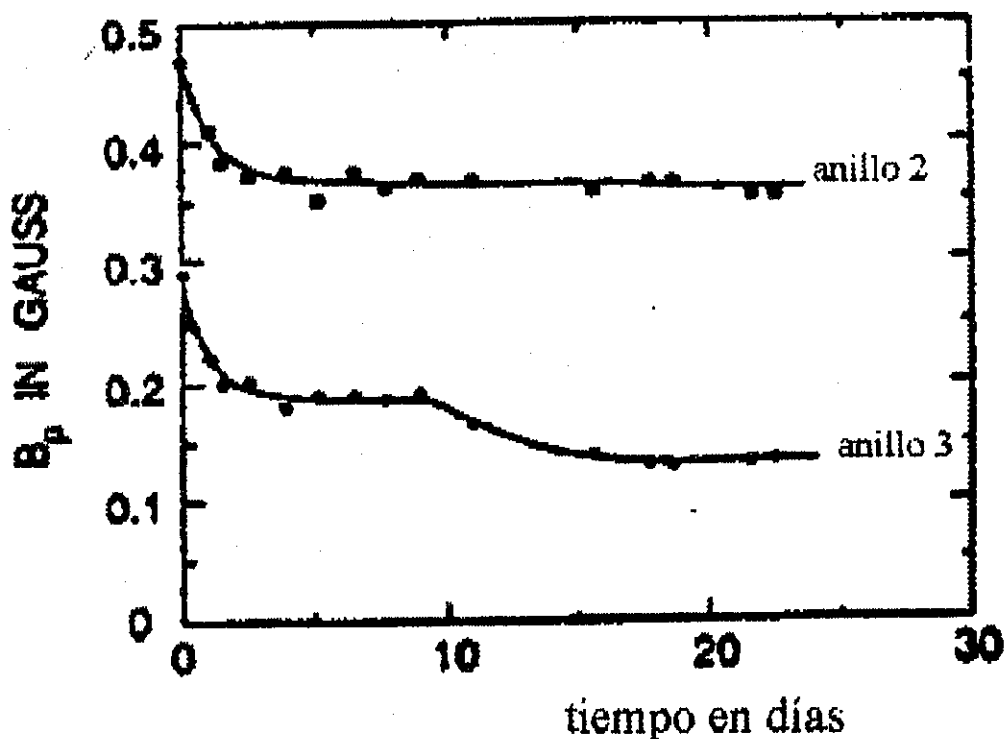


Figura No.III.15 Persistencia de la corriente en dos anillos, en un período aproximado de tres semanas.

Para el anillo No.2, la lectura muestra una caída inicial de alrededor del 20% para los primeros dos o tres días. (La probable causa de esto se discute en seguida). Luego, se tiene un comportamiento casi constante o con una caída muy lenta, manteniéndose para un tiempo de casi 3 semanas. Aunque se tiene una dispersión de más o menos 5%, la tendencia es

representada por la curva que corresponde a una caída de menos del 5% durante 17 días, en el período que va de 5 a 22 días.

Esto puede resultar muy interesante para los estudiantes, ya que se está tratando con un material cuya resistencia sólo permite un decaimiento lento como el mencionado. Suponiendo que la caída sea del 5% en un tiempo $T = 17$ días $= 1.47 \times 10^6$ Seg. y se supone que se presenta un "decaimiento exponencial" asociado con un anillo "convencional" de resistencia R . Entonces:

$$e^{-(R/L)T} = 0.95 \quad (1)$$

donde L es la inductancia del anillo. Tomando el logaritmo natural de (1) tenemos $(R/L)T = 0.051$, entonces $R/L = 0.051/T = 3.5 \times 10^{-8} \text{ S}^{-1}$. Si se toma en cuenta que la inductancia es de 6 nH, se concluye que

$$R < 2 \times 10^{-16} \Omega$$

Por supuesto, pueden lograrse exactitudes mejores si se diseña con mayor cuidado el experimento.

En 1,988, las corrientes persistentes o permanentes en un anillo de material cerámico fueron estudiadas cuidadosamente por Zahopoulos, utilizando un medidor Hall móvil en condiciones criogénicas (bajas temperaturas). Él observó un rápido (≈ 100 S) decaimiento inicial, seguido de un comportamiento de muy lento decaimiento. Este último proceso es "logarítmico" en el sentido de que la corriente cae una cantidad igual para factores de tiempo iguales. Las matemáticas para este proceso sugieren que la corriente puede permanecer virtualmente por un tiempo indefinido: por ejemplo, dependiendo del contenido de oxígeno en la muestra, podría permanecer hasta unos 1×10^{23} años (por lo menos en teoría), para que la corriente decaiga por un factor de 2. Para el caso del superconductor ordinario tipo II, este comportamiento "logarítmico" puede ser explicado por la teoría del "flujo de arrastre". En este modelo, la corriente decae por la formación y movimiento de vórtices en contra de la fuerza de Lorentz. Existen evidencias de que el rápido decaimiento inicial es asociado con el proceso de "flujo de densidad de flujo", en el cual el movimiento de vórtices resulta en corrientes de eddy (remolino). Estos efectos pueden variar grandemente de material a material. Comparando la caída inicial de los resultados (para el anillo No.2) es probable que el inicio sea la parte logarítmica, "flujo de arrastre" (el rápido "flujo de densidad de flujo" en la parte inicial no es observable en estos datos).

La "caída inicial" que es más o menos del 5%, en el anillo No.2 puede atribuirse realmente al "flujo de arrastre". Es claro que el valor de resistencia dado en (2) podría producir un decaimiento brusco entre los días 5 y 22, como se observó.

III.4.3 INDUCTANCIA PROPIA DEL ANILLO

El valor de la inductancia propia L del anillo, sirve para poner un límite superior al valor de la resistencia del mismo. También se necesita para obtener el valor teórico de la magnitud de la corriente persistente inducida al aplicarse un flujo variante.

Sin embargo, un cálculo teórico exacto de L para las dimensiones del anillo, es difícil. Una estimación burda es fácil e instructivo para un nivel introductorio. Se asumirá que el campo en el agujero del anillo es uniforme e igual al campo en el centro de una espira ideal cuyo radio sea igual al radio medio del anillo $\langle r \rangle$. Multiplicando esto por el área del agujero y dividiendo por la corriente, se tiene: $L \approx \mu_0 \pi r_1^2 / [2 \langle r \rangle]$, donde r_1 es el radio del agujero. Esto da un valor $L \approx 3.1$ nH para el anillo. Necesitaria ser seriamente cuestionado para un valor real, porque es claro el hecho de que el campo se incrementa fuertemente cerca del anillo, en el agujero.

Para obtener un valor más exacto, se ideó un método para determinar L , experimentalmente, midiendo la inductancia a alta frecuencia de un anillo de aluminio de la misma forma. Este "modelo" de anillo se escoge más grande en todas sus dimensiones que el anillo superconductor, por un factor de $S = 6$.

Sin embargo, esta estrategia obliga, por la dificultad práctica, a trabajar con un anillo pequeño, la teoría de "escalas" de inductancia con el tamaño es muy útil pedagógicamente. Esta teoría dice que si se toma una configuración de corriente dada más grande en todas sus dimensiones por un factor S , la inductancia se incrementa por el mismo factor.

Este hecho es equivalente a decir que la inductancia tiene, fundamentalmente, las dimensiones de longitud y puede ser explicado a un nivel introductorio como sigue: por simplicidad se considera una espira de alambre circular. Para una corriente dada, incrementando el tamaño de la espira por un factor S podría decrecer el campo en el centro por el mismo factor. Esto es porque debido a la ley de Biot-Savart, el efecto de cada elemento de corriente se decreta por factor S^2 , mientras que el número de tales elementos se incrementa por un factor S . (El mismo argumento se aplica si el campo es muestreado en puntos no en el centro del agujero del anillo, sino puntos localizados a una fracción dada del centro de la circunferencia del anillo). En tanto que el área de la espira (o de la correspondiente banda anular) tenga una escala de S^2 , el flujo total a través de tal espira es $S^2(1/S) = S$. Esto completa la prueba de una espira. Es claro que el argumento es de aplicación general y no restringido a espiras circulares.

Para medir la inductancia L_S del modelo de anillo "a escala", se corta en dos mitades en forma de "C", separadas por una fina (0.005plg) hoja de Teflón, como se muestra en la siguiente figura: (la separación entre estas mitades está exagerada en la figura)

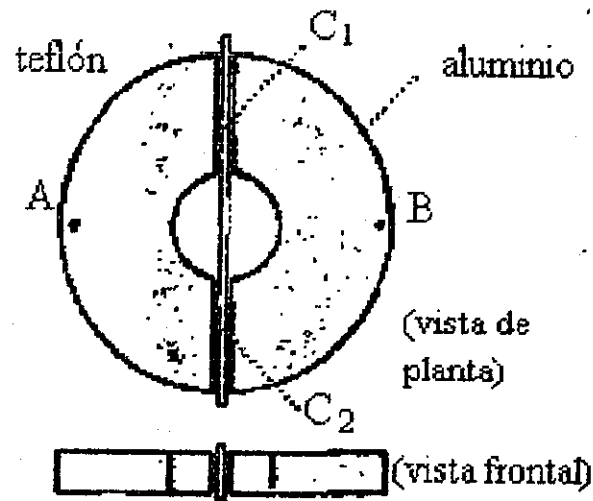


Figura No.III 16 Modelo de anillo de aluminio utilizado para la medición de la inductancia.

Las mitades son fuertemente unidas usando un hilo-cable de nylon para circundar el disco compuesto. A lo largo de las dos regiones rectangulares de contacto con el teflón, las mitades forman dos capacitancias iguales C_1 y C_2 . Usando un medidor de capacitancias digital, se mide primero la capacitancia $C_{AB} = C_1 + C_2 = 2C_1$ entre los puntos A y B. Luego se busca la frecuencia de resonancia f_0 del anillo compuesto. Esta es la frecuencia a la cual una corriente puede circular en el anillo a través de las capacitancias C_1 y C_2 . Esta distribución de corriente circulante podría ser completamente similar a las inducidas en el anillo sólido por una rápida variación de flujo; para este caso, éstas son corrientes de desplazamiento fluyendo a través de las capacitancias.

En el experimento se puede medir la frecuencia de resonancia. Teóricamente, f_0 es determinada por la inductancia del anillo L_S y la combinación en serie de C_1 y C_2 . Tomando en cuenta que $C_1/2 = C_{AB}/4$, se tiene:

$$2\pi f_0 = (L_S C_{AB}/4)^2 \quad (3)$$

Resolviendo (3) para L_S se obtiene:

$$L_S = 1/(\pi^2 f_0^2 C_{AB}) \quad (4)$$

Experimentalmente, $C_{AB} = 175$ pF, y $f_0 = 132.9$ Mhz, por lo que la Ec. (4) nos da $L_S = 33$ nH.

tomando en cuenta la teoría de "escalas", se llega a determinar que:

$$L = L_S/S = 5.6 \text{ nH}$$

Como una demostración de la inductancia de un anillo conductor ordinario cuyas dimensiones son similares al anillo utilizado como superconductor, es probablemente buena a un porcentaje pequeño. Se necesita considerar, sin embargo, que la inductancia efectiva del anillo superconductor depende de la distribución espacial la supercorriente. Por ejemplo, L puede ser considerablemente alta si una pequeña rendija radial cerca del agujero del anillo obliga a la supercorriente a disminuir.

III.4.4 CONCLUSIÓN

Las corrientes persistentes pueden ser estudiadas de manera no complicada a un nivel introductorio utilizando un anillo obtenible comercialmente de material cerámico "123". Las observaciones cualitativas pueden ser demostradas en lecturas o probando experimentalmente en el laboratorio. Se puede seguir el comportamiento en un periodo de varias semanas. El valor de la inductancia propia del anillo, que se necesita para hallar un límite superior de la posible resistencia del anillo, puede ser calculada sólo someramente o determinada, experimentalmente, por medio de la inductancia de un anillo modelo usando el argumento de "escalas". Todo esto es de interés pedagógico y en cuanto a los aspectos cualitativos, es accesible a un nivel introductorio. Las corrientes inducidas en el anillo se "saturan", en función del flujo cambiante aplicado, esto es un efecto atribuible a la naturaleza granular de la muestra de material considerado.

El experimento provee una particularmente motivante demostración de superconductividad y un interesante suplemento para temas introductorios de electromagnetismo.

Existe, además, una variedad de experimentos demostrativos que permiten la ilustración de las características de los materiales superconductores. Sólo con la utilización de materiales cerámicos cuya temperatura de transición sea igual o ligeramente superior a la temperatura del nitrógeno líquido o del helio líquido, cuyas temperaturas son: nitrógeno líquido 77 K, y helio líquido 42 K. El nitrógeno líquido no es difícil de obtener y si se conserva dentro de cualquier recipiente hecho con cualquier aislante térmico, permanece en el estado líquido durante unas 24 horas. Entre los experimentos que pueden realizarse se pueden mencionar: *El efecto Meissner, Medición de la Temperatura Crítica utilizando el efecto*

Meissner, El efecto de la suspensión de la superconductividad (levitación magnética), Almacenaje de energía eléctrica en un anillo superconductor, entre otros. Actualmente, existe un "kit" de elementos necesarios para experimentos demostrativos con materiales superconductores, fabricado por la compañía Colorado Superconductors Inc., el cual trae, además, una guía de experimentos.

Sólo para ilustrar lo práctico que es realizar experimentos de esta naturaleza se describirá, brevemente, el siguiente.

III.5 EL EFECTO MEISSNER

Una de las características de los superconductores que es fácil de demostrar, es el efecto Meissner. Los superconductores son fuertemente diamagnéticos. Esto significa entonces que experimentan una fuerza de repulsión cuando son afectados por un campo magnético. Esto es diferente a un material conductor perfecto, lo cual significa solamente que presenta resistencia cero al flujo de una corriente eléctrica. Por lo que un material superconductor es esencialmente distinto de un conductor perfecto. Contraria a la popular creencia, la ley de inducción de Faraday sola no explica la repulsión magnética que experimenta un superconductor. A una temperatura inferior a la temperatura crítica T_c , no permite ningún campo magnético dentro de él. Esto es porque los dipolos magnéticos microscópicos, son inducidos en el superconductor que se opone al campo aplicado. Este campo inducido entonces repele la fuente del campo aplicado y, consecuentemente, repelerá el magneto asociado a dicho campo. Esto implica que si un imán permanente (magneto) se coloca sobre un superconductor cuando está a una temperatura inferior a su Temperatura Crítica y si este magneto es enfriado hasta por debajo de T_c , el superconductor podría anular el campo magnético del imán. Esto puede observarse, muy claramente, cuando el propio imán permanente es repelido y, entonces, experimenta una levitación magnética sobre el superconductor. Para que este experimento sea exitoso, la fuerza de repulsión debe ser mayor al peso del imán. El fenómeno de repulsión magnética es lo que recibe el nombre de Efecto Meissner (en honor a su descubridor).

Otra observación interesante es que el imán levitado no desplaza el superconductor. Este, aparentemente, equilibrio estable es una fenómeno que sólo se manifiesta en superconductores de determinado tipo, como cerámicos superconductores de alta temperatura crítica (cerámicos con base de bismuto y/o de itrio). Aquí, las líneas de flujo magnético

asociadas con el imán pueden penetrar el cuerpo del superconductor en forma de "tubos de flujo magnético". Estos tubos de flujo existen debido a imperfecciones o impurezas en la matriz cristalina del superconductor.

El procedimiento que se sigue para el experimento es el que se describe a continuación:

1.- Viértase cuidadosamente una pequeña cantidad de nitrógeno líquido en un plato o cualquier otro recipiente adecuado, hasta que el nivel del líquido sea de, aproximadamente, un cuarto de pulgada.

Cuando se realiza esto el líquido burbujea fuertemente por un corto período, por lo que debe esperarse hasta que el burbujeo termine.

2.- Utilizando unas pinzas adecuadas, colóquese, cuidadosamente, el disco superconductor en el líquido hasta que se cubra toda su superficie del nitrógeno líquido.

De nuevo el nitrógeno burbujeará, en esta ocasión, alrededor del disco. También espérese hasta que cese de burbujear.

3.- De nuevo utilizando las pinzas, levántese el imán con que se cuenta e inténtese balancearlo sobre el disco superconductor.

En vez de caer sobre la superficie del superconductor, el imán simplemente "flotará" a unos pocos milímetros sobre dicho superconductor.

Esta es una demostración del efecto Meissner.

Las precauciones que deben tomarse para la realización de este experimento son: cuando se vierta el nitrógeno líquido, debe hacerse cuidadosamente para evitar salpicaduras; realécese el experimento en un salón con buena ventilación; no se toque ningún objeto inmerso en el nitrógeno líquido con las manos hasta que alcancen la temperatura ambiental, para realizar movimientos utilécese pinzas.

Si el imán levitado sobre el superconductor se rota cuidadosamente, se observará que dicho imán continuará rotando por un tiempo largo. Esta es una demostración del aspecto magnético de ausencia de fricción utilizado en el efecto Meissner. La velocidad rotacional del imán cúbico puede incrementarse usando una pajilla de plástico y soplando una corriente de aire en una de las esquinas del imán. El imán cúbico naturalmente está sujeto a la resistencia del aire. Por lo que puede esperarse que se detendrá después de cierto tiempo. Un imán de

CONCLUSIONES

1.- La tendencia de la enseñanza de la ingeniería, en los últimos años, es enfatizar en los distintos aspectos de principios básicos y los métodos analíticos, por lo que es de vital importancia que el estudiante adquiera conocimientos sólidos en los cursos de formación científica.

2.- La adecuación de determinados aspectos que pueden darle un carácter más motivacional al proceso de enseñanza-aprendizaje del electromagnetismo, despertará el interés en el estudiante y/o ayudará a encauzar correctamente el interés ya existente en él, por el aprendizaje verdadero de dichos temas. Logrando de esta manera, que el estudiante adquiera una formación sólida en el aspecto científico.

3.- Relacionando los distintos temas del electromagnetismo con fenómenos naturales y experimentos reales, despertará el interés del estudiante por el aprendizaje de los mismos; porque encuentra una aplicabilidad práctica y una relación con su medio natural, de los conocimientos que va adquiriendo.

4.- Adaptando aspectos importantes de la enseñanza, los cuales se contemplan en la pedagogía y la didáctica general, a la enseñanza del electromagnetismo, se logra darle un carácter más motivacional al mismo.

5.- La utilización de la computadora personal como recurso de apoyo en la enseñanza, por medio de experimentos demostrativos, contribuye a darle un carácter más ameno y motivacional a la enseñanza del electromagnetismo.

6.- Adecuando y diseñando experimentos que ilustran la validez de las distintas leyes del electromagnetismo y adecuando los diferentes temas para una mejor comprensión de los mismos se logrará, en parte, darle un carácter didáctico a la enseñanza del electromagnetismo.

7.- Los avances de la ciencia y la técnica, permiten, que actualmente, se disponga de procesos de manufactura que permiten obtener materiales cuyo comportamiento se aproxima bastante al ideal; de tal manera que se puede utilizar este hecho como una ventaja para la adecuación de los temas de la Teoría Electromagnética.

RECOMENDACIONES GENERALES

1.- Tomar en cuenta los distintos aspectos pedagógicos y didácticos de la enseñanza en general, para lograr una mejora en el proceso de enseñanza-aprendizaje de los cursos de formación científica de la ingeniería eléctrica y electrónica.

2.- Aprovechar los avances que la técnica y la ciencia ofrecen en la actualidad, para lograr darle a la enseñanza de los cursos de formación científica, un carácter más motivacional.

RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS

1.- A los profesores de Teoría Electromagnética y, en general, a los profesores de los cursos de formación científica, se les recomienda hacer conciencia a los estudiantes, de la importancia del papel que juegan estos cursos en la formación de todo buen profesional de la ingeniería, para un desenvolvimiento satisfactorio en la sociedad cambiante en que le toca actuar.

2.- A los instructores de laboratorio de la Teoría Electromagnética, trabajar en coordinación conjunta con los profesores del curso, para adecuar el desarrollo del laboratorio, de tal manera que se pueda enfatizar en los aspectos que más se necesita y evitar así desfases desventajosos entre el desarrollo de la clase teórica y el laboratorio.

3.- A los estudiantes de las ingenierías eléctrica y electrónica, se les recomienda tomar conciencia de que, debido a los rápidos adelantos que experimenta la tecnología eléctrica, es de suma importancia adquirir conocimientos sólidos en los cursos de formación científica, pues, esto permite una mejor adaptación a todos esos cambios que día a día experimentan la ciencia y la técnica, para un buen desarrollo y desenvolvimiento profesional.

BIBLIOGRAFÍA

- BOYLESTAD, Robert & Nashelsky, Louis. **Electrónica Teoría de Circuitos**. México, Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 1989. 845pp.
- Colorado Superconductors Incorporated. **Experiment Guide for Superconductors Demonstrations**. 1,994. 36 pp.
- GONZÁLEZ, Diego. **Didáctica o Dirección del Aprendizaje**. La Habana, Cultural S.A. 1946. 342 pp.
- GONZÁLEZ, Diego. **Filosofía de la Educación**. La Habana, Cultural S.A. 1947. 172 pp.
- GRANT, I.S. & Phillips W.R. **Electromagnetismo**. México, Limusa, 1979. 579pp.
- GUILLEN DE REZZANO, Clotilde. **Didáctica General y Especial**. Buenos Aires, Editorial Kapeluz, 1965. 211pp.
- HAYT, William Jr. **Teoría Electromagnética**. México, McGraw Gill Interamericana S.A. de C.V. 1,991. 525 pp.
- Hogeschool Van Utrecht, The Ntherlands. **The Didactics of Electromagnetism**.
- JOHNK, Carl T. **Teoría Electromagnética, Principios y Aplicaciones**. México, Limusa, 1981. 741pp.
- KRAUS, John D. **Electromagnetismo**. México, McGraw Gill S.A. de C.V. 1,986. 852 pp
- LIU, Fuhun; Tucker, Rochelle R. y Heller, Peter. **Nitrogen Temperature Superconducting Ring**. Waltham, Massachusetts. Departament of Physics, Brandeis University. 1989.
- LONDON, Fritz. **Superfluids. Macroscopic Theory of Superconductivity**. New York, Dover Publications, Inc.

LUE, Chin-Shan. **The Physics Teacher.** Kaohsiung, Taiwan. Department of Physics,
National Sun Yat-Sen University. Vol.32, May 1994.

LUZURIAGA, Lorenzo. **Pedagogía.** Buenos Aires, Editorial Losada, 1991. 331pp.

LUZURIAGA, Lorenzo. **Métodos de La Nueva Educación.** Buenos Aires, Editorial Losada,
1961. 376pp.

MIRA y López, Emilio. **Cómo Estudiar y Cómo Aprender.** Buenos Aires, Editorial
Kapeluz, 1967. 111pp.

REITZ, Jhon R.; Milford, Frederick J. & Christy, Robert W. **Fundamentos de Teoría
Electromagnética.** México, Fondo Educativo Interamericano, 1984. 584pp.

ROSAS, Lucía & Riveros, Héctor. **Iniciación al Método Científico Experimental.** México,
Trillas, 1984. 207pp.

APÉNDICE A

LISTADO DEL PROGRAMA DE SOLUCIÓN POR COMPUTADORA A LA ECUACIÓN DE LAPLACE EN DOS DIMENSIONES

```
Uses Crt,Graph;
Const
  N=100;
Var
  Mat:Array [1..N,1..N] Of Real;
  {***Sirve para simular los puntos de el cuadro***}
  ContX,Fila,Columna:Integer;
  {***Variables para moverse por la matriz***}
  Superior,Inferior,Derecho,Izquierdo:Real;
  {***Para almacenar los valores de los bordes de el cuadro***}
  SNumero,Valor_Superior,Valor_Inferior,Valor_Derecho,Valor_Izquierdo:String;
  {***Para Leer los valores en forma de caracteres***}
  Salir:Boolean;
  {***Sirve para saber si se acaba el programa***}
  Llave,Opcion:Char;
  {*** Para leer teclas***}
  Suma_Anterior:Real;
  {*** Para Almacenar un valor sirve en comprobacion ***}
  Numero:Integer;
  {*** Guarda el numero de puntos ***}
  Linea_Horizontal_Actual,Linea_Vertical_Actual,NLineas,MaxX,MaxY:Integer;
  {** Guardan las dimensiones de la pantalla en pixeles ***}
  IncrementoX,IncrementoY,ValorLineaH,ValorLineaV,ValorPixel:Real;
  {** Ayudan en la presentacion final **}
  Aumento,Esta,Ante,Linea_Horizontal:Boolean;
  {*** Sirve para el mensaje de trabajando ***}

Procedure Lectura(Tipo: Char,Digits,Xxx,Yyy:Integer;
  Var Information:String);
Var
  Carac:Char; {---Donde se lee la tecla presionada---}
  Vector_Information:String; {---Donde se almacena toda la informacion---}
  Contador_datos:Integer; {---Lleva el control de los caracteres en el vector---}
  PosXxx,PosYyy:Integer; {--Llevan la posicion de el cursor--}

Procedure Incrementar;
{--Agrega un caracter a la cadena ya ingresada e
Incrementa la posicion del cursor --}
Begin
  If ((Pos('.',Vector_Information)≠0) Or
  (Pos('-',Vector_Information)≠0))
  Then Dec(Contador_Datos);
  {--Lee el tamaño de la cadena ignorando . y --}
```

```

If (PosXxx<80) And (Contador_Datos<Digits)

Then
  Begin
    Vector_Information:=Vector_Information+Carac;
    Inc(PosXxx)
  End;
End;

Procedure Eliminar;
(-- Elimina un caracter de el vector y modifica la posicion del cursor--)
Begin
  Vector_Information:=copy(Vector_Information,1,Contador_Datos-1);
  If PosXxx>Xxx
  Then Dec(PosXxx);
  Gotoxy(Xxx,Yyy);Write(Vector_Information);Write(' ');
End;

Procedure Tipo_Correcto;
(-- Lee las diferentes opciones de ingreso
A Numeros Enteros
B Numeros Reales --)
Begin
  Vector_Information:="";
  Contador_Datos:=0;
  PosXxx:=Xxx;
  PosYyy:=Yyy;
(--Inicializacion de Valores--)
  Repeat
    Gotoxy(PosXxx,PosYyy);
    Carac:=Ucase(ReadKey);
(--Lee un caracter--)
    Contador_Datos:=Length(Vector_Information);
(--Lee la cantidad de caracteres ingresados para usarlo posteriormente en
En los procedimientos ingreso y eliminar--)
    Case Carac Of
      '0'..'9':If ((Tipo='A') Or (Tipo='B'))
        Then
          Incrementar;
      '!':If ((Tipo='B') And (Pos('.',Vector_Information)=0))
        Then If Vector_Information=""
          Then
            Begin
              Carac:='0';
              Incrementar;
              Carac:='.';
              Incrementar;
            End
          Else Incrementar;
      #8:Eliminar;
    End;
  Until Carac=#8;
End;

```

```

    End;
    (--Lee las opciones para las teclas--)
    Gotoxy(Xxx, Yyy); Write(Vector_Information);
    (--Actualiza la informacion de el vector en la pantalla--)
    Until ((Carac=#13) Or (Carac=#27))
End;

Begin
    If ((Tipo>='A') And (Tipo<='B'))
    Then Tipo_Correcto
    Else Vector_Information:="";
    (--Verifica que sea el tipo correcto--)
    If Carac=#27
    Then Vector_Information:="";
    Information:=Vector_Information;
    (--Traslada la informacion a la variable que reconoce el programa--)
End;

Procedure Estimacion;
{*** Realiza una estimacion en los puntos seleccionados***}
Var
    Suma:Real;
Begin
    Suma:=0;
    For Fila:=2 To Numero-1 Do
        For Columna:=2 To Numero-1 Do
            Begin
                Mat[Fila,Columna]:=(Mat[Fila-1,Columna]+Mat[Fila+1,Columna]+
                    Mat[Fila,Columna-1]+Mat[Fila,Columna+1])/4;
                Suma:=Suma+Round(1000*Mat[Fila,Columna]);
                If Round((Suma_Anterior-Suma))=0
                Then Salir:=True;
            End;
            Suma_Anterior:=Suma;
        End;
    End;

End;

Procedure Inicializacion;
{***Inicializa la matriz y los parametros iniciales***}
Var
    Drive,Mode:Integer;
Begin
    Drive:=Detect;
    InitGraph(Drive,Mode,"");
    {***Inicializa el modo Grafico***}
    Aumento:=True;
    Suma_Anterior:=0;
    MaxX:=GetMaxX;
    MaxY:=GetMaxY;
    {*** Obtiene la resolucion de la pantalla ***}
    IncrementoX:=(MaxX-110)/(Numero-1);

```

```

IncrementoY:=(MaxY-90)/(Numero-1);
{*** Calcula el incremento a usar en la posicion de los puntos ***}
  DirectVideo:=False;
  NLineas:=0;
End;

Procedure Colocacion;
{*** Coloca los valores de los bordes***}
{*** Coloca Los valores Promedios en las esquinas***}
Var
  Xi:Integer;
Begin
  Mat[1,1]:=(Superior+Izquierdo)/2;
  Mat[1,Numero]:=(Superior+Derecho)/2;
  Mat[Numero,1]:=(Inferior+Izquierdo)/2;
  Mat[Numero,Numero]:=(Inferior+Derecho)/2;
  For Xi:=2 To Numero-1 Do
    Begin
      Mat[1,Xi]:=Superior;
      Mat[Numero,Xi]:=Inferior;
      Mat[Xi,1]:=Izquierdo;
      Mat[Xi,Numero]:=Derecho;
    End;
  End;

Procedure Conversion;
{*** Convierte los valores tipo string a valores numericos ***}
Var
  Z:Integer;
Begin
  Val(Valor_Superior,Superior,Z);
  Val(Valor_Inferior,Inferior,Z);
  Val(Valor_Derecho,Derecho,Z);
  Val(Valor_Izquierdo,Izquierdo,Z);
  Val(SNumero,Numero,Z);
  Numero:=Numero+2;
  Colocacion;
End;

Procedure Ingreso_De_Limites;
{*** Ingressa los valores de los bordes de el cuadro***}
Const
  Posicionx:=5;
  Posiciony:=5;
{** Para Saber donde Colocar los datos de entrada **}
Var
  Valor,Zx:Integer;
Begin
  ClrScr;
  Gotoxy(Posicionx+10,Posiciony-2);Write("Ingrese los valores de los Bordes");
  Gotoxy(Posicionx,Posiciony);Write("Voltaje Superior=");

```



```

Lectura('B',7,Posicionx+17,Posiciony,Valor_Superior);
If Valor_Superior<>"
Then
  Begin
    Gotoxy(Posicionx,Posiciony+1);Write("Voltaje Inferior=");
    Lectura('B',7,Posicionx+17,Posiciony+1,Valor_Inferior);
    If Valor_Inferior<>"
    Then
      Begin
        Gotoxy(Posicionx,Posiciony+2);Write("Voltaje Izquierdo=");
        Lectura('B',7,Posicionx+18,Posiciony+2,Valor_Izquierdo);
        If Valor_Izquierdo<>"
        Then
          Begin
            Gotoxy(Posicionx,Posiciony+3);Write("Voltaje Derecho=");
            Lectura('B',7,Posicionx+16,Posiciony+3,Valor_Derecho);
            If Valor_Derecho<>"
            Then Repeat
              Sound(1000);Delay(100);NoSound;
              Gotoxy(Posicionx,Posiciony+6);Write("# De Divisiones= ");
              Lectura('A',2,Posicionx+16,Posiciony+6,SNumero);
              Val(SNumero,Valor,Zx);
              Until ((Valor<60) And (Valor>4))
            Else Salir:=True;
          End
        Else Salir:=True
        End
      End
    Else Salir:=True
    End
  End
Else Salir:=True;
If Not(Salir)
Then Conversion;
End;

Procedure Trabajando;
{*** Desplega un mensaje y unos puntos intermitentes mientras trabaja ***}
Begin
  Gotoxy(1,1);Write("Trabajando");
  If ((ContX<30) And (Aumento))
  Then
    Begin
      Gotoxy(ContX,1);Write('.');
      Inc(ContX);
    End
  Else
    Begin
      Aumento:=False;
      If ContX>11
      Then
        Begin
          Gotoxy(ContX,1);Write(' ');
        End
      End
    End
  End
End;

```

```

        Dec(ContX);
    End
    Else Aumento:=True;
End;
End;

Procedure Buscar_IntervaloV1(FilaY:Integer,
    Var ColumnaX:Integer);
{***Busca el intervalo donde se encuentra el valor en forma vertical ascendente***}
Var
    Terminar:Boolean;
Begin
    Terminar:=False;
    ColumnaX:=0;
    Repeat
        Inc(ColumnaX);
        If (((Mat[FilaY,ColumnaX]>=ValorLineaV) And (Mat[FilaY,ColumnaX+1]<=ValorLineaV)) Or
            ((Mat[FilaY,ColumnaX]<=ValorLineaV) And (Mat[FilaY,ColumnaX+1]>=ValorLineaV)))
            Then Terminar:=True
        Until ((ColumnaX>=Numero-1) Or (Terminar));
    Esta:=Terminar;
End;

Procedure Buscar_IntervaloV2(FilaY:Integer,
    Var ColumnaX:Integer);
{***Busca el intervalo donde se encuentra el valor en forma vertical descendente***}
Var
    Terminar:Boolean;
Begin
    Terminar:=False;
    ColumnaX:=Numero;
    Repeat
        Dec(ColumnaX);
        If (((Mat[FilaY,ColumnaX]>=ValorLineaV) And (Mat[FilaY,ColumnaX+1]<=ValorLineaV)) Or
            ((Mat[FilaY,ColumnaX]<=ValorLineaV) And (Mat[FilaY,ColumnaX+1]>=ValorLineaV)))
            Then Terminar:=True
        Until ((ColumnaX<=1) Or (Terminar));
    Esta:=Terminar;
End;

Procedure Lineas_Verticales(Descendente:Boolean);
{***Traza una linea de un punto a otro***}
Var
    Cxc,Fyc:Integer;
Begin
    Ante:=False;
    For Fyc:=2 to Numero-1 Do
        Begin
            Esta:=False;
            If Descendente
                Then Buscar_IntervaloV2(Fyc,Cxc)

```

```

Else Buscar_IntervaloV1(Fyc,Cxc);
If Mat[Fyc,Cxc]-Mat[Fyc,Cxc+1]<=0
Then ValorPixel:=IncrementoX*Abs((ValorLinesV-Mat[Fyc,Cxc])/(Mat[Fyc,Cxc]-Mat[Fyc,Cxc+1]));
If Ante
Then MoveTo(Round(55+(CXC-1)*IncrementoX+ValorPixel),Round(65+(Fyc-1)*IncrementoY));
If ((Fyc>2) And (Esta))
Then Begin
LineTo(Round(55+(CXC-1)*IncrementoX+ValorPixel),Round(65+(Fyc-1)*IncrementoY));
Ante:=False;
End
Else If Esta
Then Begin
MoveTo(Round(55+(CXC-1)*IncrementoX+ValorPixel),Round(65+(Fyc-
1)*IncrementoY));
Ante:=False;
End
Else Ante:=True;
End;
End;

```

```

Procedure Buscar_IntervaloH1(ColumnaX:Integer,
Var FilaY:Integer);
Var
Terminar:Boolean;
Begin
Terminar:=False;
FilaY:=0;
Repeat
Inc(FilaY);
If (((Mat[FilaY,ColumnaX]>=ValorLinesH) And (Mat[FilaY+1,ColumnaX]<=ValorLinesH)) Or
(Mat[FilaY,ColumnaX]<=ValorLinesH) And (Mat[FilaY+1,ColumnaX]>=ValorLinesH)))
Then Terminar:=True
Until ((FilaY>=Numero-1) Or (Terminar));
Esta:=Terminar;
End;

```

```

Procedure Buscar_IntervaloH2(ColumnaX:Integer,
Var FilaY:Integer);
Var
Terminar:Boolean;
Begin
Terminar:=False;
FilaY:=Numero;
Repeat
Dec(FilaY);
If (((Mat[FilaY,ColumnaX]>=ValorLinesH) And (Mat[FilaY+1,ColumnaX]<=ValorLinesH)) Or
(Mat[FilaY,ColumnaX]<=ValorLinesH) And (Mat[FilaY+1,ColumnaX]>=ValorLinesH)))
Then Terminar:=True
Until ((FilaY<=1) Or (Terminar));
Esta:=Terminar;

```

```

End;

Procedure Lineas_Horizontales(Descendente:Boolean);
Var
  Cxc,Fyc:Integer;
Begin
  Ante:=False;
  For Cxc:=2 to Numero-1 Do
    Begin
      Esta:=False;
      If Descendente
      Then Buscar_IntervaloH2(Cxc,Fyc)
      Else Buscar_IntervaloH1(Cxc,Fyc);
      If Mat[Fyc,Cxc]-Mat[Fyc+1,Cxc]<>0
      Then ValorPixel:=IncrementoY*Abs((ValorLineaH-Mat[Fyc,Cxc])/(Mat[Fyc,Cxc]-Mat[Fyc+1,Cxc]));
      If Ante
      Then MoveTo(Round(55+(Cxc-1)*IncrementoX),Round(65+(Fyc-1)*IncrementoY+ValorPixel));
      If ((Cxc>2) And (Esta))
      Then Begin
        LineTo(Round(55+(Cxc-1)*IncrementoX),Round(65+(Fyc-1)*IncrementoY+ValorPixel));
        Ante:=False;
      End
      Else If Esta
      Then Begin
        MoveTo(Round(55+(Cxc-1)*IncrementoX),Round(65+(Fyc-
1)*IncrementoY+ValorPixel));
        Ante:=False;
      End
      Else Ante:=True;
    End;
  End;

Procedure Dibujar_Lineas_Verticales;
{Dibuja las lineas verticales de la funcion}
Var
  Centro,Division1,Division2:Real;
  I,Divisiones:Integer;
Begin
  Divisiones:=NLineas;
  Centro:=(Mat[1,2]+Mat[Numero,2]+Mat[2,1]+Mat[2,Numero])/4;
  Division1:=Abs(Mat[3,1]-Centro)/(Divisiones/2+1);
  Division2:=Abs(Mat[3,Numero]-Centro)/(Divisiones/2+1);
  For I:=1 To Round(Divisiones/2) Do
    Begin
      If Centro>Mat[3,1]
      Then ValorLineaV:=Abs(Centro-Division1*I)
      Else ValorLineaV:=Abs(Centro+Division1*I);
      Lineas_Verticales(False);
    End;
  For I:=1 To Trunc(Divisiones/2) Do
    Begin

```

```

    If Centro>Mat[2,Numero]
    Then ValorLineaV:=Abs(Centro-Division2*I)
    Else ValorLineaV:=Abs(Centro+Division2*I);
    Lineas_Verticales(True);
End;

End;

Procedure Dibujar_Lineas_Horizontales;
Var
  Centro,Division1,Division2:Real;
  I,Divisiones:Integer;
Begin
  Divisiones:=NLineas;
  Centro:=(Mat[1,2]+Mat[Numero,2]+Mat[2,1]+Mat[2,Numero])/4;
  Division1:=Abs(Mat[1,3]-Centro)/(Divisiones/2+1);
  Division2:=Abs(Mat[Numero,3]-Centro)/(Divisiones/2+1);
  For I:=1 To Round(Divisiones/2) Do
  Begin
    If Centro>Mat[1,2]
    Then ValorLineaH:=Abs(Centro-Division1*I)
    Else ValorLineaH:=Abs(Centro+Division1*I);
    Lineas_Horizontales(False);
  End;
  For I:=1 To Trunc(Divisiones/2) Do
  Begin
    If Centro>Mat[Numero,2]
    Then ValorLineaH:=Abs(Centro-Division2*I)
    Else ValorLineaH:=Abs(Centro+Division2*I);
    Lineas_Horizontales(True);
  End;
End;

End;

Procedure Puntos;
{*** Dibuja los puntos deseados ***}
Var
  Xc,Yc:Integer;
Begin
  SetFillStyle(1,White);
  For Xc:=1 To Numero-2 Do
  Begin
    For Yc:=1 To Numero-2 Do
    Begin
      PieSlice(Round(55+Xc*IncrementoX),Round(65+Yc*IncrementoY),0,360,1);
    End;
  End;
End;

Procedure Presentacion;
{** Despliega los resultados en modo grafico **}

```

```

Begin
  SetFillStyle(9,Blue);
  Bar(1,1,MaxX,MaxY);
  SetFillStyle(1,Blue);
  Bar(50,60,MaxX-50,MaxY-20);
  SetFillStyle(9,Blue);
  Bar(50,60,60,70);
  Bar(MaxX-60,60,MaxX-50,70);
  Bar(50,MaxY-30,60,MaxY-20);
  Bar(MaxX-60,MaxY-30,MaxX-50,MaxY-20);
  SetFillStyle(1,Black);
  Bar(55,65,MaxX-55,MaxY-25);
  SetTextStyle(1,0,1);
  OutTextxy(Trunc(MaxX/2)-10,40,Valor_Superior);
  OutTextxy(Trunc(MaxX/2)+10,MaxY-20,Valor_Inferior);
  SetTextStyle(1,1,1);
  OutTextxy(25,Trunc(MaxY/2),Valor_Izquierdo);
  OutTextxy(MaxX-47,Trunc(MaxY/2),Valor_Derecho);
  SetColor(Red);
  SetTextStyle(1,0,1);
  OutTextxy(10,20,'F1 Ayuda');
End;

Procedure Mover_Linea_Vertical(Var ValLinea:Real);
Var
  Centro,Division1,Division2:Real;
  Divisiones:Integer;
Begin
  Divisiones:=NLineas;
  Centro:=(Mat[1,2]+Mat[Numero,2]+Mat[2,1]+Mat[2,Numero])/4;
  Division1:=Abs(Mat[3,1]-Centro)/(Divisiones/2+1);
  Division2:=Abs(Mat[3,Numero]-Centro)/(Divisiones/2+1);
  If Linea_Vertical_Actual<=Round(Divisiones/2)
  Then Begin
    If Centro>Mat[3,1]
    Then ValorLineaV:=Abs(Centro-Division1*Linea_Vertical_Actual)
    Else ValorLineaV:=Abs(Centro+Division1*Linea_Vertical_Actual);
    Lineas_Verticales(False);
  End
  Else Begin
    If Centro>Mat[3,Numero]
    Then ValorLineaV:=Abs(Centro-Division2*(NLineas-Linea_Vertical_Actual+1))
    Else ValorLineaV:=Abs(Centro+Division2*(NLineas-Linea_Vertical_Actual+1));
    Lineas_Verticales(True);
  End;
  ValLinea:=ValorLineaV;
End;

Procedure Mover_Linea_Horizontal(Var ValLinea:Real);
Var
  Centro,Division1,Division2:Real;

```

```

Divisiones:Integer;
Begin
  Divisiones:=NLineas;
  Centro:=(Mat[1,2]+Mat[Numero,2]+Mat[2,1]+Mat[2,Numero])/4;
  Division1:=Abs(Mat[1,3]-Centro)/(Divisiones/2+1);
  Division2:=Abs(Mat[Numero,3]-Centro)/(Divisiones/2+1);
  If Linea_Horizontal_Actual<=Round(Divisiones/2)
  Then Begin
    If Centro>Mat[1,2]
    Then ValorLineaH:=Abs(Centro-Division1*Linea_Horizontal_Actual)
    Else ValorLineaH:=Abs(Centro+Division1*Linea_Horizontal_Actual);
    Lineas_Horizontales(False);
  End
  Else Begin
    If Centro>Mat[Numero,2]
    Then ValorLineaH:=Abs(Centro-Division2*(NLineas-Linea_Horizontal_Actual+1))
    Else ValorLineaH:=Abs(Centro+Division2*(NLineas-Linea_Horizontal_Actual+1));
    Lineas_Horizontales(True);
  End;
  ValLinea:=ValorLineaH;
End;

Procedure Mover;
{*** Mueve el cursor por todos los puntos de el cuadro ***}
Var
  AContX,AContY,ContX,ContY:Integer;
  ValorAnterior,ValorActual,SLineas:String;
  Llave:Char;
  Z,Ejex,Ejey:Integer;
  Xx,Yy,AXx,AYy:Integer;
  Valor_Linea_Actual:Real;
  Linea_Horizontal_Anterior,Linea_Vertical_Anterior:Integer;
  Mientras_Horizontal,Mientras_Vertical:Integer;
  Espera:Integer;
Begin
  ContX:=1;
  ContY:=1;
  AcontX:=1;
  AContY:=1;
  Linea:=False;
  Linea_Horizontal_Actual:=1;
  Linea_Horizontal_Anterior:=1;
  Linea_Vertical_Actual:=1;
  Linea_Vertical_Anterior:=1;
  Horizontal:=True;
  TextColor(Red);
  Gotoxy(1,1);Write(' Valor Actual=');
  Repeat
    Gotoxy(16,1);Write(' ');
    If Linea
    Then Begin

```

```

AXx:=Round(55+IncrementoX*ContX);
AYy:=Round(65+IncrementoY*ContY);
SetColor(White);
Circle(AXx,AYy,1);
PutPixel(AXx,AYy,White);
SetColor(Green);
Mientras_Horizontal:=Linea_Horizontal_Actual;
Linea_Horizontal_Actual:=Linea_Horizontal_Anterior;
Mover_Linea_Horizontal(Valor_Linea_Actual);
Linea_Horizontal_Actual:=Mientras_Horizontal;
Mover_Linea_Horizontal(Valor_Linea_Actual);
Mientras_Vertical:=Linea_Vertical_Actual;
Linea_Vertical_Actual:=Linea_Vertical_Anterior;
Mover_Linea_Vertical(Valor_Linea_Actual);
Repeat
SetColor(Red);
If Horizontal
Then Begin
    Linea_Horizontal_Actual:=Mientras_Horizontal;
    Mover_Linea_Horizontal(Valor_Linea_Actual);
    Gotoxy(17,1);Write(Valor_Linea_Actual:2:2);
    End
Else Begin
    Linea_Vertical_Actual:=Mientras_Vertical;
    Mover_Linea_Vertical(Valor_Linea_Actual);
    Gotoxy(17,1);Write(Valor_Linea_Actual:2:2);
    End;
Espera:=0;
Repeat
    Espera:=Espera+1;
Until (KeyPressed) Or (Espera=2999);
SetColor(Green);
If Horizontal
Then Begin
    Linea_Horizontal_Actual:=Mientras_Horizontal;
    Mover_Linea_Horizontal(Valor_Linea_Actual);
    Gotoxy(17,1);Write(Valor_Linea_Actual:2:2);
    End
Else Begin
    Linea_Vertical_Actual:=Mientras_Vertical;
    Mover_Linea_Vertical(Valor_Linea_Actual);
    Gotoxy(17,1);Write(Valor_Linea_Actual:2:2);
    End;
Espera:=0;
Repeat
    Espera:=Espera+1;
Until (KeyPressed) Or (Espera=2999);
Until KeyPressed;
End
Else Begin
    If NLineas<>0

```



```

Then SetColor(Green)
Else SetColor(Black);
If Horizontal
Then Mover_Linea_Horizontal(Valor_Linea_Actual)
Else Mover_Linea_Vertical(Valor_Linea_Actual);
Gotoxy(17,1);Write(Mat[ContY+1,ContX+1]:4.2);
Xx:=Round(55+IncrementoX*ContX);
AXx:=Round(55+IncrementoX*AContX);
Yy:=Round(65+IncrementoY*ContY);
AYy:=Round(65+IncrementoY*AContY);
SetColor(Red);
Circle(AXx,AYy,1);
PutPixel(AXx,AYy,Red);
Repeat
  SetColor(White);
  PutPixel(Xx,Yy,White);
  Circle(Xx,Yy,1);
  Espera:=0;
  Repeat
    Espera:=Espera+1;
  Until (KeyPressed) Or (Espera=2999);
  SetColor(Red);
  PutPixel(Xx,Yy,Red);
  Circle(Xx,Yy,1);
  Espera:=0;
  Repeat
    Espera:=Espera+1;
  Until (KeyPressed) Or (Espera=2999);
Until KeyPressed;
End;
Llave:=UpCase(ReadKey);
Case Llave Of
#77:If Llave
  Then Begin
    Linea_Vertical_Anterior:=Linea_Vertical_Actual;
    If Linea_Vertical_Actual>1
    Then Dec(Linea_Vertical_Actual)
    Else Linea_Vertical_Actual:=NLineas;
    Horizontal:=False;
  End
Else Begin
  AContX:=ContX;
  AContY:=ContY;
  If ContX<Numero-2
  Then Inc(ContX)
  Else ContX:=1;
End;
#75:If Llave
  Then Begin
    Linea_Vertical_Anterior:=Linea_Vertical_Actual;
    If Linea_Vertical_Actual<NLineas

```

```

    Then Inc(Linea_Vertical_Actual)
    Else Linea_Vertical_Actual:=1;
    Horizontal:=False;
  End
Else Begin
  AContX:=ContX;
  AContY:=ContY;
  If ContX>1
  Then Dec(ContX)
  Else ContX:=Numero-2;
End;
#80:If (Linea)
Then Begin
  Linea_Horizontal_Anterior:=Linea_Horizontal_Actual;
  If Linea_Horizontal_Actual>1
  Then Dec(Linea_Horizontal_Actual)
  Else Linea_Horizontal_Actual:=NLineas;
  Horizontal:=True;
End
Else Begin
  AContY:=ContY;
  AContX:=ContX;
  If ContY<Numero-2
  Then Inc(ContY)
  Else ContY:=1;
End;
#72:If (Linea)
Then Begin
  Linea_Horizontal_Anterior:=Linea_Horizontal_Actual;
  If Linea_Horizontal_Actual<NLineas
  Then Inc(Linea_Horizontal_Actual)
  Else Linea_Horizontal_Actual:=1;
  Horizontal:=True;
End
Else Begin
  AContY:=ContY;
  AContX:=ContX;
  If ContY>1
  Then Dec(ContY)
  Else ContY:=Numero-2;
End;
L:Begin
  Gotoxy(1,1);Write(
  Gotoxy(1,1);Write(Numero de Lineas=);
  Lectura(A,2,18,1,SLineas);
  Val(SLineas,NLineas,Z);
  SetColor(White);
  Presentacion;
  Puntos;
  SetColor(Green);
  Dibujar_Lineas_Verticales;

```

```

SetColor(Green);
Dibujar_Lineas_Horizontales;
Gotoxy(16,1);Write(
Gotoxy(1,1);Write( Valor Actual=);
End;
#9:If Linea
Then Linea:=False
Else If NLineas>0
Then Linea:=True;
#59:Begin
SetTextStyle(3,0,1);
SetFillStyle(1,DarkGray);
Bar(1,20,140,180);
SetColor(Red);
OutTextxy(10,30,'Esc');
SetColor(Black);
OutTextxy(55,30,'Salir');
SetColor(Red);
OutTextxy(10,45,'L');
SetColor(Black);
OutTextxy(55,45,'Lineas');
SetColor(Red);
OutTextxy(10,65,'Tab');
SetColor(Black);
OutTextxy(55,65,'Cambiar');
SetColor(Red);
SetTextStyle(3,1,1);
OutTextxy(10,85,'->');
SetTextStyle(3,0,1);
SetColor(Black);
OutTextxy(55,85,'Arriba');
SetColor(Red);
OutTextxy(10,105,'<-');
SetColor(Black);
OutTextxy(55,105,'Izquierda');
SetColor(Red);
OutTextxy(10,125,'->');
SetColor(Black);
OutTextxy(55,125,'Derecha');
SetColor(Red);
SetTextStyle(3,1,1);
OutTextxy(10,145,'<-');
SetTextStyle(3,0,1);
SetColor(Black);
OutTextxy(55,145,'Abajo');
SetColor(White);
Repeat
Until KeyPressed;
SetColor(White);
Presentacion;
SetColor(Red);

```

```

        Gotoxy(16,1);Write('          ');
        Gotoxy(1,1);Write(' Valor Actual=');
        Puntos;
        SetColor(Green);
        Dibujar_Lineas_Verticales;
        SetColor(Green);
        Dibujar_Lineas_Horizontales;
    End;
End;
Until Llave=#27;
End;

Begin
Repeat
    TextBackGround(Blue);
    ContX:=11;
    For Fila:=1 To N Do
        For Columna:=1 To N Do
            Mat[Fila,Columna]:=0;
        Salir:=False;
        Ingreso_de_Limites;
        Inicializacion;
        If Not(Salir)
        Then
            Begin
                ClearDevice;
                Presentacion;
                Puntos;
                Repeat
                    Estimacion;
                    Trabajando;
                Until Salir;
                Mover;
            End;
            Gotoxy(1,1);Write('          Desea Continuar S/N? ');
            Gotoxy(51,1);Opcion:=Uppcase(ReadKey);
            CloseGraph;
            TextColor(White);
            ClrScr;
        Until Opcion='N'
    End;
End;

```

APÉNDICE B

INFORMACIÓN ACERCA DEL FUNCIONAMIENTO Y UTILIZACIÓN DEL IP-COACH

Lo que se enuncia a continuación es sólo una descripción breve del funcionamiento y la manera de utilización del equipo de IP-COACH (Interface Program COACH) el cual consta tanto del software como de elementos de hardware especiales para la medición de parámetros de fenómenos físicos por medio de la computadora. Se trata de un equipo Holandés, cuya aplicación se extiende a cualquiera de las ramas de la física como ciencia experimental y no solamente al electromagnetismo, que es el interés central en éste tratado. Este programa es muy versátil y puede adaptarse a la medición de gran riqueza de variables en experimentos físicos, que solo dependerá de la habilidad e ingenio del usuario para adaptarlo a sus intereses y necesidades.

Como parte del equipo de IP-COACH, se tienen los siguientes sensores: sensor de fuerza, sensor de temperatura, sensor de voltaje, sensor de presión, sensor de luz, sensor de desplazamiento lineal, sensor de desplazamiento angular y sensor de radiación ionizante.

En el caso del sensor de voltaje éste se aplica de manera directa a un "panel", el cual estará conectado a un puerto paralelo de la computadora.

Para cualesquiera de los otros sensores debe tenerse una alimentación de 5 Volts al "panel" mencionado.

Sin importar el tipo de sensor que se esté utilizando, se necesita convertir esta señal, a una señal de voltaje variable entre 0 y 5 Volts, por lo que será necesario realizar una calibración antes de realizar cualquier medición (excepto para mediciones directas de voltaje). Ésta calibración se refiere al software del IP-COACH, en donde se cuenta con una opción de calibración (se explicará más adelante) a la que habrá que ingresar y grabar la señal de voltaje obtenida para determinado valor de la señal con que se esté trabajando (fuerza, presión, voltaje, etc.)

Cada uno de los sensores disponibles traen sus respectivos instructivos, en donde se puede disponer de información acerca de la correcta utilización de dicho sensor, de los cuidados que deben tenerse en su utilización y, además, se dispone de sugerencias de experimentos que son posibles de montar, para determinar o medir determinado parámetro, ya sea de manera directa o de manera indirecta con el sensor en cuestión.

El panel con que se cuenta es el que se muestra a continuación.

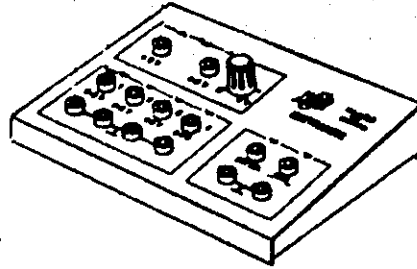


Figura No.1 Pánel con cuatro canales de entrada para la conexión de los distintos sensores disponibles.

Este panel cuenta con cuatro entradas donde pueden conectarse los sensores que se desea. Por lo que es posible realizar la medición de más de un parámetro de un experimento físico a la misma vez. La utilización de los canales disponibles, es indistinto, pero, es importante mencionar que los canales 1 y 2 tienen una mayor sensibilidad comparados con los canales 3 y 4. Por lo que es aconsejable utilizar los canales 1 y/o 2 cuando es necesario medir parámetros cuya variación sea pequeña.

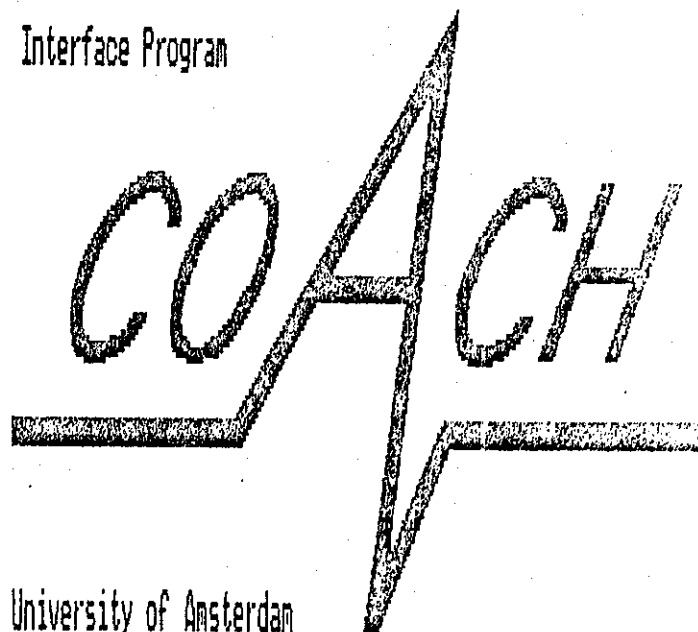
Además, el panel provee los 5 voltios necesarios para la alimentación del equipo. La toma de éstos 5 Voltios se hace con la banana adicional de que disponen todos y cada uno de los sensores disponibles.

Habiendo realizado el montaje físico del experimento y conectado el sensor como es debido, corresponde manipular el software que es llamado IP-COACH. A continuación se describe la forma de utilización de cada uno de las comandos de los menús disponibles.

B.1 CÓMO ENTRAR Y SALIR DEL PROGRAMA IP-COACH

Cuando se tienen todos los archivos correspondientes al programa IP-COACH copiados en algún directorio específico del disco duro, IP-COACH se arranca tecleando "COACH", luego ENTER. Al activar dicho programa, aparecerá el siguiente formato en la pantalla del computador:

Interface Program



University of Amsterdam

Centre for

Microcomputer Applications

Figura No. 2

Del cual se puede salir presionando cualquier tecla.

Cuando se hayan culminado los trabajos en IP-COACH, se puede salir del mismo seleccionando la opción "QUIT" del menú principal. Esta acción debe ser confirmada presionando "YES", como se ilustra en la siguiente figura. Cada uno de los subprogramas tienen la misma opción, la cual se usa para retornar al menú principal.

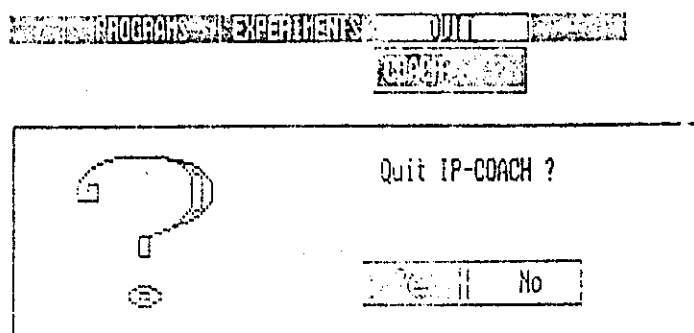


Figura No.3 Finalización del trabajo en IP-COACH, seleccionando "QUIT" del menú principal.

B.2 UTILIZACIÓN DE LAS TECLAS

[OAAA1]En la siguiente tabla se muestran las teclas básicas que se usan en el programa IP-COACH. En la pantalla aparece una "barra de selección", de manera invertida (al colocarse en las opciones que aparecen en la parte superior de la pantalla del menú principal y de los submenús). Para moverse a cambiar esta barra, se hace utilizando las flechas hacia la derecha o hacia la izquierda. Presionando ENTER (o RETURN) se confirma la selección de la opción en la que se encuentre en ese momento.

| TECLA | FUNCIÓN |
|--------------------------------|---|
| →←↑↓ | - Teclas de flechas, utilizadas para mover la barra de selección a través del menú. Las flechas → y ← también son utilizadas para seleccionar un valor de una lista. |
| ENTER (↵) Esc | - Tecla para confirmar la opción en la que se encuentre posicionado. - Tecla para cancelar una operación, salir de alguna ventana o submenú, o restablecer un valor antiguo. |
| F1 - F10 | - Teclas de funciones. Estas teclas tienen distintos significados en diferentes programas. |
| Shift F1-Shift F10 Num-Lock | - Teclas de funciones inversas. - Num-Lock ON (luz encendida en el teclado) activa entradas numéricas. Num-Lock OFF activa las teclas de flechas. |
| F1 o ? Barra espaciadora | - Activa la ayuda rápida. - Esta tecla es utilizada tanto para Esc, como para Enter, dependiendo de la opción en |

B.3 SELECCIÓN DE UN PROGRAMA U OPCIÓN

La selección de un programa u opción del menú principal, se realiza moviéndose en la barra invertida al programa específico u opción deseada (usando las teclas de flecha). Estando en el programa u opción que se desea, se presiona ENTER, para activar dicho programa.

En la siguiente figura se muestra la variedad de programas y funciones disponibles.

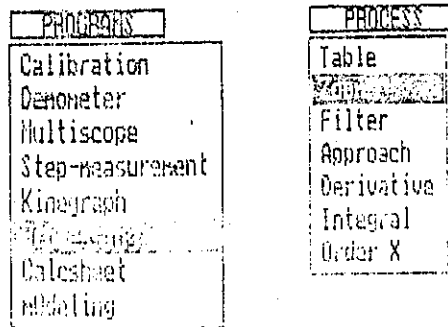


Figura No.4

La cantidad de programas y funciones con que se cuenta en este programa, es grande. Por lo que la descripción detallada de cada una de ellas, escapa al alcance y objetivos de la presente tesis. Sin embargo, se describirá, someramente, los aspectos más relevantes de algunos de ellos. Pero, para la persona que esté interesada en profundizar su utilización, tanto el equipo, como los manuales se encuentran en el Departamento de Física de la Facultad de Ingeniería de la USAC.

De los programas disponibles, los más usuales son: CALIBRATION, DEMOMETER, MULTISCOPE, STEP MEASUREMENT, PROCESSING Y MODELING. Los cuales se describirán, brevemente, a continuación.

B.3.1 CALIBRATION. Esta opción sirve para llevar a cabo la calibración correspondiente a la medición del parámetro que se desee. Sin importar el tipo de parámetro que se va a medir debe llevarse a cabo la calibración para obtener las medidas reales de los parámetros. Por otro lado, esta calibración se necesita llevar a cabo sin importar el tipo de medición que se lleve a cabo, es decir, debe calibrarse tanto para MULTISCOPE, como para STEP MEASUREMENT y DEMOMETER. (Estas funciones se describirán más adelante).

Al activar la opción CALIBRATION, aparecerá en pantalla el siguiente menú:

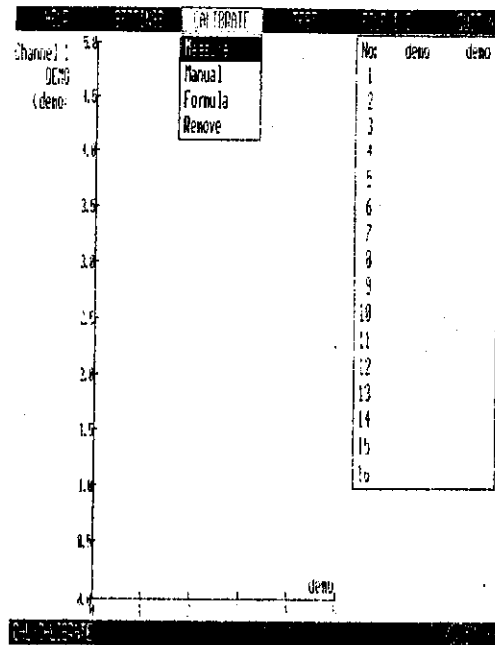


Figura No. 5

Para agregar "puntos" a la calibración se escoge la opción **CALIBRATE**. De esto la opción **Measure** y, luego, **Add cal. points**.

Si se desea eliminar o corregir uno o varios puntos de alguna calibración realizada con anterioridad, deberá escogerse **Remove cal. points**, en lugar de **Add cal. points**.

La manera en que se calibra, es chequeando los voltajes que el equipo va recibiendo con un determinado valor del parámetro que se esté tratando. Por ejemplo, si se desea calibrar el equipo para mediciones de fuerza; después de colocar el sensor de fuerza al panel y proveer una alimentación de 5 Vots. (los cuales se obtienen del mismo panel) se hace llegar al sensor determinada fuerza conocida y el voltaje que se obtenga como efecto de esta fuerza debe agregarse como un punto en la calibración. La adición de un punto se lleva a cabo presionando la tecla **ENTER**. Luego con otra fuerza conocida, diferente de la anterior se obtendrá un voltaje distinto que también habrá que agregarlo como un punto en el proceso de calibración. Estas fuerzas conocidas se obtienen, por ejemplo colgando masas conocidas al sensor de fuerza, porque en este caso, la fuerza aplicada es conocida tomando en cuenta que el peso de la masa está dada por la fórmula $W = mg$.

El orden en que se ingresan los datos de la calibración no es importante, pues, al salirse de la opción correspondiente, el programa los ordena automáticamente en forma ascendente. Además, al salirse de esta opción el programa pregunta si se quieren guardar los nuevos datos de calibración. Esta calibración puede guardarse en el disco duro de la máquina

o en algún diskette, si así se desea. Esto representa una ventaja para cualquier trabajo posterior, puesto que en tal caso ya no habrá que volver a realizar la calibración, sino, simplemente, recuperar los datos de calibración guardados.

B.3.2 DEMOMETER. Este programa es utilizado para realizar mediciones de señales analógicas, intervalos de tiempo, frecuencias y anchos de pulsos.

Antes de iniciar cualquier medición con este programa, debe haberse realizado la calibración correspondiente.

B.3.3 MULTISCOPE. Este programa sirve para visualizar en pantalla la gráfica correspondiente a la medición de cualquier señal analógica en función del tiempo.

Primero que nada, debe realizarse la calibración correspondiente al tipo de medición que se vaya a efectuar. Seguidamente, se escoge el canal correspondiente al "panel", al cual está conectado el o los sensores que se estén utilizando. Además, se dispone de cuatro gráficas en las cuales se puede visualizar la entrada de cada uno de los canales. Para cada una de las gráficas, se tiene la opción de variar tanto la escala del eje vertical, como la del eje horizontal de tal manera que las escalas sean adaptadas al tipo de medición que se va a realizar. En el caso del eje horizontal que corresponde al tiempo, se dispone desde escalas de microsegundos, hasta tiempo en horas.

Por otro lado, se tienen las opciones de que el inicio de la medición se lleve a cabo de manera manual o, bien, fijando un nivel de **TRIGGER**, que toda vez alcanzado, empezará a correr el conteo del tiempo. Está disponible, además, un **PRETRIGGER**, donde el tiempo que se le asigne, será el tiempo que se va a tener como valores negativos en el eje horizontal (tiempo).

Todo lo anterior se lleva a cabo en el submenú **SETTINGS**, del programa **MULTISCOPE**.

Cuando se está listo para empezar la medición, es decir, cuando se hayan efectuado todos los ajustes necesarios, se escoge el submenú **MEASURE**, luego, **Start**. En este momento, el programa estará esperando la señal de inicio, según se haya escogido en forma manual o con un Trigger.

B.3.4 STEP MEASUREMENT. Con este programa se pueden realizar mediciones de dos parámetros distintos a la misma vez, asignando cada uno de ellos a uno de los ejes correspondientes a la gráfica que se desea obtener. Estas mediciones pueden ser de una señal analógica versus señal de pulsos (de cualquier parámetro físico) o, bien, de pulsos versus tiempo. Para el primer caso, se tiene una independencia total del tiempo y en cualquiera de los dos casos, la obtención de la gráfica se puede diseñar de tal manera que el usuario es el que elige la cantidad de puntos o pulsos que necesita graficar y el intervalo entre cada uno de ellos con tal de obtener la mejor definición posible de la gráfica.

Al igual que en el caso de MULTISCOPE, se disponen de cuatro gráficas; pero como en éste caso, tanto para el eje vertical como para el eje horizontal de las gráficas se tienen señales de entrada externas, sólo es posible construir dos gráficas a la vez, ya que el panel dispone de cuatro canales de entrada. Debe recordarse que los canales 3 y 4 son menos sensibles que los canales 1 y 2.

Cuando se hayan realizados los ajustes necesarios, la medición se inicia eligiendo el submenú MEASURE y, luego, START.

B.3.5 PROCESSING. Este subprograma es muy importante para obtener la gráfica en la forma deseada. En él se puede variar el tamaño global de la gráfica, variar de manera individual la escala de cada eje de la gráfica; además, se puede obtener una gráfica de la integral y la derivada de la gráfica original.

Una parte importante de este subprograma, es el hecho de contar con la posibilidad de filtrar la señal que se tenga en la gráfica, es decir, se puede eliminar, hasta cierto grado, el ruido existente en la gráfica, de tal manera que al final se tenga una gráfica bien definida y libre de cualquier tipo de ruido.

B.3.6 MODELLING. Este subprograma es útil para buscar un modelo matemático que describa la gráfica obtenida. Es decir, buscar una función o ecuación cuya gráfica se aproxime a la gráfica obtenida en la medición realizada. El modelo puede sobreponerse a la gráfica original, de tal manera que se puede visualizar cómo se va aproximando el modelo a la gráfica real. De este modo, se tendrá la expresión matemática que describirá ésta gráfica de medición real y contrastarla con lo que debiera ser, teóricamente.

En la siguiente tabla se resumen las más relevantes de los subprogramas mencionados anteriormente.

| PROGRAMA | CARACTERÍSTICAS |
|------------------|--|
| Demometer | Medición de señales analógicas, intervalos de tiempo, frecuencias, anchos de pulsos. Despliega: Números y tablas en la pantalla. |
| Multiscope | Medición de señales analógicas contra tiempo. Despliega: variedad de gráficas en la pantalla. |
| Step Measurement | Medición de señales analógicas contra pulsos de entrada o pulsos contra tiempo. Despliega: gráficas en la pantalla. |
| Processing | Procesamiento de los datos obtenidos en la medición. Variación de tamaño de gráficas, filtraje de ruido, diferenciación, integración, etc. |
| Calcsheet | Procesamiento de datos medidos. Manipulación matemática de columnas de datos. |
| Modelling | Crea y prueba modelos. Compara estos modelos con la gráfica real. |
| Calibration | Realiza calibraciones de sensores, los cuales pueden ser usados los programas de medición. (Demometer, Step Measurement, Multiscope) |
| Control | Puede desarrollar un sistema de control. Una especie de automatización, útil para experimentos complejos. |
| Kinegraph | Para mediciones de posición y velocidad. Requiere hardware especial. |

B.4 CÓMO OBTENER AYUDA

Cada uno de los programas cuenta con una opción en el menú, la cual sirve para ayuda. La opción "HELP" es una función que proporciona ayuda general. Alternativamente, puede obtenerse ayuda en cualquier posición en que se esté en el programa tecleando la tecla de función F1. En este caso se obtendrá ayuda específica acerca de la función o programa en que se encuentre el cursor.

A veces, la información de ayuda abarca varias páginas, por lo que puede moverse a través de ella usando las teclas <PgUp> y <PgDn>. Para salir del submenú de ayuda se utiliza la tecla ESC.