

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.**



**Propagación y Radiación Electromagnética I**  
**EE-521**

**Eduardo Olivera / Marcial López**

**Lima-Perú**  
**2,000**

© **2,000**. Todos los derechos reservados  
Primera Impresión Marzo del 2,000

La Información suministrada en este libro se asume esencialmente correcta, pero los autores no asumen ninguna responsabilidad por el uso de ésta, se permite su copia para uso personal, siempre y cuando no se altere el contenido del mismo.

Acerca de los autores:

Eduardo Olivera Polo , Ingeniero Electrónico de la UNI, universidad donde ejerció la docencia desde 1,981 hasta 1,997. En la actualidad es profesor ordinario del Departamento de Ingeniería de la PUCP.

Marcial López Tafur, Ingeniero Electrónico de la UNI, Profesor Asociado, ejerce la docencia desde 1,980 hasta la fecha en la UNI, también es consultor de proyectos de telecomunicaciones y temas afines.

## Prefacio

El propósito de los autores es el de contribuir a un mejor conocimiento de la Teoría Electromagnética, especialmente para la parte del electromagnetismo, hemos podido observar en el transcurso de varios años de dictado, que este tipo de cursos presentan problemas para el alumno, que es, generalmente, el de visualizar el fenómeno físico, a partir del modelo matemático, para ello, se ha tratado en los ejemplos, de clarificar la teoría sin incidir demasiado en la complejidad matemática, dado que estos tiempos de software de simulación y amplia información (internet), el tener el concepto claro es mas importante que el resolver problemas mecánicamente, hay que mencionar a los estudiantes que en la vida profesional, la capacidad de resolver problemas entendiendo las causas de estos, es importante, que tratar de aplicar recetas que no se adecuen al problema que uno enfrenta y hagan que la situación se complique; en la vida de estudiante, esto último equivale a resolver problemas tipos, de memoria o mecánicamente.

Para los estudiantes que quieran especializarse en telecomunicaciones, diseño de maquinas eléctricas, es muy importante esta parte de la teoría Electromagnética por lo cual recomendamos darle el mayor empeño a su estudio.

UNI, Lima Febrero del 2,000

Eduardo Olivera y Marcial López

# Contenido:

## Capítulo 1:

<b>Magnetostática del vacío</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
1.2. Fuerza Magnética sobre una corriente.	1
1.3. Vector Inducción ( <b>B</b> )	1
1.3.1. Ley de Ampere	1
Ejemplo 1.1 (Filamento infinito de corriente)	1
1.3.2. Ley de Biot - Savart	2
1.4. Potencial Vectorial <b>A</b> .	3
1.4.1 Ecuación diferencial para <b>A</b>	3
1.4.2 <b>A</b> en función de la corriente	4
1.4.3 Flujo de <b>B</b> y circulación de <b>A</b>	4
1.5 Potencial Escalar Magnético	4
1.6 Momento dipolar magnético	4
1.6.1 Campo B de un circuito pequeño	4
1.6.2 Expresiones para evaluar <b>m</b>	5
1.7 Casos especiales	6
1.7.1 Bobina de Helmholtz	6
1.7.2 Aplicación (Cascaón esférico girando con densidad de carga)	6
1.7.3 Aplicación (Hallar B en puntos fuera del eje de simetría para una espira)	7
1.7.4 Aplicación (Calcular B para un plano infinito con corriente superficial)	8
1.7.5 Problema (Hallar B en el centro de dos espiras poligonales)	9

## Capítulo 2:

<b>Magnetostática en la Materia.</b>	<b>11</b>
2.1 Introducción	11
2.2 Vector Magnetización	11
2.3 Potencial Vectorial en la materia	11
2.4 Potencial Escalar en la materia	11
2.5 Campo Magnético en la materia	12
2.5.1 Intensidad de campo H	12
2.5.2 Ecuaciones fundamentales.	12
Ejemplo 2.1 (Imán permanente recto)	12
Ejemplo 2.2 (Magneto cilíndrico de gran longitud)	13
Ejemplo 2.3 (Magneto en forma de esfera hueca)	13
Ejemplo 2.4 ( Imán en forma de segmento esférico)	14
2.6 Clasificación de la materia por sus propiedades magnéticas	14
2.6.1 Materiales diamagnéticos	14
2.6.2 Materiales paramagnéticos	14
2.7 Ferromagnetismo y los materiales magnéticos	15
2.7.1 Teoría de los Dominios	15
2.7.2 Curva de Magnetización	16
2.7.3 Lazo de Histéresis	16
Ejemplo 2.5 (Determinar la $\mu_r$ de una cáscara cilíndrica de Fe)	17
Ejemplo 2.6 (Circuitos magnéticos con imanes permanentes).	17
Ejemplo 2.7 (Transformador de poder)	17
Apéndice	18

## Capítulo 3:

<b>Solución de Problemas con condiciones de frontera.</b>	<b>19</b>
3.1 Introducción	19
3.2 Comportamiento de los vectores de campo magnético en una frontera.	19
3.2.1 Intensidad de campo <b>H</b>	19
3.2.2 Inducción de campo <b>B</b>	19
3.3 Problemas de contorno en coordenadas cartesianas	19

Ejemplo 3.3.1 (Plano con densidad superficial de corriente) . . . . .	20
Ejemplo 3.3.2 (Modelo de entrehierro en una máquina eléctrica) . . . . .	20
3.4 Problemas de contorno en coordenadas esféricas . . . . .	21
Ejemplo 3.4.1 (Esfera con magnetización propia uniforme) . . . . .	21
Ejemplo 3.4.2 (Hallar el factor de blindaje de un cascarón esférico de Fe). . . . .	22
3.5 Problemas con geometría cilíndrica . . . . .	23
Ejemplo 3.5.1 (Material magnético en forma de cilindro largo) . . . . .	23
3.6 Conductores perfectos y ferromagnetismo ideal . . . . .	23
3.7 Método de las imágenes . . . . .	24
Ejemplo 3.7.1 . . . . .	24
Ejemplo 3.7.2 . . . . .	25
Ejemplo 3.7.3 . . . . .	25

## Capítulo 4:

<b>Inducción Electromagnética y Corrientes Variables . . . . .</b>	<b>27</b>
4.1 Ley de Faraday de la inducción . . . . .	27
4.1.1 Sistema en reposo . . . . .	27
4.1.2 Sistemas en movimiento relativo . . . . .	28
Ejemplo 4.1 . . . . .	28
Ejemplo 4.2 . . . . .	30
Ejemplo 4.3 . . . . .	30
4.2 Conversión electromecánica . . . . .	31
4.3 Autoinductancia y coeficiente de autoinducción . . . . .	31
Ejemplo 4.4 . . . . .	31
Ejemplo 4.5 . . . . .	32
Ejemplo 4.6 . . . . .	32
Ejemplo 4.7 . . . . .	32
4.4 Inductancia mutua y coeficiente de inducción mutua. . . . .	32
Ejemplo 4.8 . . . . .	33
Ejemplo 4.9 . . . . .	33
4.5 Corrientes de Foucault (eddy currents) . . . . .	34
4.6 Generador Homopolar (disco de Faraday) . . . . .	34
Notas de aplicación práctica para este capítulo . . . . .	35
Apéndice 4.1. . . . .	36
Apéndice 4.2. . . . .	36

## Capítulo 5

<b>Energía Magnética . . . . .</b>	<b>37</b>
5.1 Relación entre trabajo eléctrico y flujo magnético en un circuito estático . . . . .	37
Ejemplo 5.1 . . . . .	37
Ejemplo 5.2 . . . . .	37
5.2 Relación entre trabajo mecánico y flujo magnético en un circuito móvil. . . . .	38
Ejemplo 5.3 . . . . .	38
5.3 Flujo magnético, energía almacenada y trabajo desarrollado por un circuito . . . . .	38
Ejemplo 5.4 . . . . .	39
5.4 La energía magnética en términos de los vectores de campo . . . . .	39
5.4.1 La energía magnética y $\mathbf{A}$ . . . . .	39
Ejemplo 5.5 . . . . .	39
5.4.2 La energía magnética, $\mathbf{B}$ y $\mathbf{H}$ . . . . .	39
Ejemplo 5. . . . .	39
5.4.3 Cálculo de $L$ usando el método de la energía. . . . .	40
Ejemplo 5.7 . . . . .	40
5.5 Energía magnética y curva de histéresis . . . . .	40
5.5.1 Ecuación de Steinmetz . . . . .	41
5.6 Cálculo de Fuerzas y Torques por el método de la energía . . . . .	41
Ejemplo 5.8 . . . . .	41
5.6.1 Expresiones particulares para la energía magnética . . . . .	42

Ejemplo 5.9	42
Ejemplo 5.10	43
5.6.2 Diversas aplicaciones de la fuerza por interacción magnética.	43
Ejemplo 5.11	44

## Capítulo 6

<b>Electrodinámica. Propagación de O.E.M. Planas</b>	<b>47</b>
6.1 Las ecuaciones de Maxwell.	47
Ejemplo 6.1	47
Ejemplo 6.2	47
Ejemplo 6.3	48
6.1.1 Autoconsistencia de las ecuaciones de Maxwell.	48
6.1.2 Relaciones constitutivas	48
6.1.3 Condiciones de Contorno	48
6.2 Naturaleza ondulatoria del campo electromagnético	48
6.2.1 O.E.M. Planas	49
6.2.2 Solución de la ecuación de onda en el dominio de la frecuencia.	49
Ejemplo 6.4	50
Ejemplo 6.5	51
6.2.3 Medio conductores semi-infinitos	51
6.2.4 Efecto pelicular en buenos conductores	52
6.2.5 Conductividad aparente y efectiva	52
6.3 Balance dinámico de energía en el campo electromagnético.	53
Ejemplo 6.6	53
Ejemplo 6.7	54
Ejemplo 6.8	54
6.4 Propagación de O.E.M. planas a través de varios medios	54
6.4.1 Incidencia Normal.	54
6.4.2 Incidencia Oblicua	54
6.4.3 Incidencia normal sobre un buen conductor	56
Ejemplo 6.9	56
Ejemplo 6.10	57
Problemas Propuestos: (Archivo de Prácticas Calificadas, Exámenes y Tareas)	59