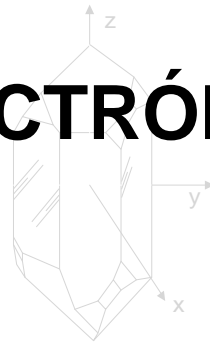


# TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

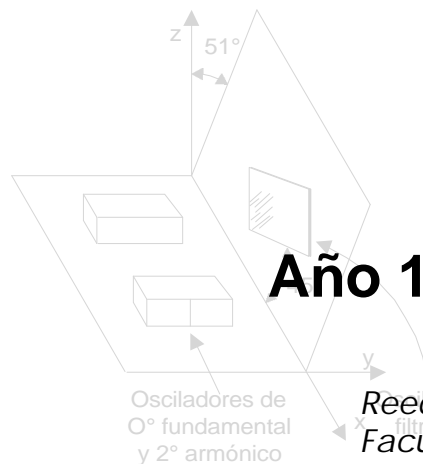
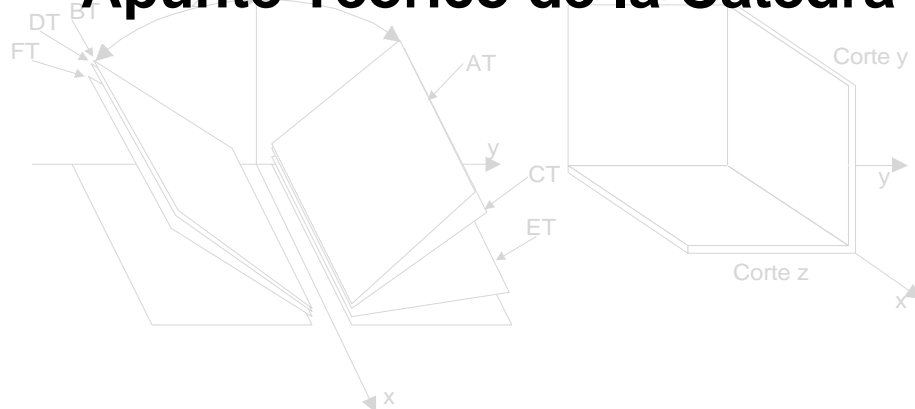
Osciladores y filtros de coeficiente 0 de temperatura

Alta frecuencia  
AT (+35° 15')  
BT (-49°)

Baja frecuencia  
CT(+36°)  
DT(-52°)  
ET(66°)  
FT(-57°)



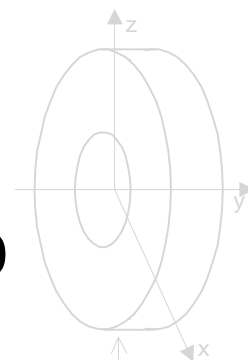
## Apunte Teórico de la Cátedra



**Año 1999**

Osciladores de  
0° fundamental  
y 2° armónico

Reeditado y corregido por alumnos de la  
Facultad Córdoba  
Universidad Tecnológica Nacional





<b>1 Capítulo I</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Materiales conductores</b>	<b>5</b>
1.1.1 Principales propiedades y características de los materiales conductores	5
1.1.1.1 Conductividad eléctrica $\sigma_e$ (Resistividad eléctrica $\rho_e$ )	5
1.1.1.2 Coeficiente térmico de resistividad $\alpha$	6
1.1.1.3 Conductividad térmica $\sigma_\theta$	7
1.1.1.4 Fuerza termoelectromotriz	8
1.1.1.5 Resistencia mecánica	9
1.1.2 Diversos tipos de materiales conductores	9
1.1.2.1 Materiales conductores de alta conductividad	9
1.1.2.2 Materiales conductores de alta resistividad	11
1.1.2.2.1 Característica y clasificación de las aleaciones de alta resistividad	12
1.1.2.2.2 Otros materiales usados como conductores resistivos (los carbones)	14
1.1.3 Materiales para contactos eléctricos	15
1.1.3.1 Materiales de alta conductividad	15
1.1.3.2 Materiales de alta resistencia a la corrosión	15
1.1.3.3 Materiales duros, refractarios o resistentes al arco	15
1.1.3.4 Materiales de alta conductividad y resistentes al arco	16
1.1.4 Materiales para fusibles eléctricos	16
1.1.4.1 Consideraciones sobre la elección de materiales para fusibles	17
<b>1.2 Materiales no conductores</b>	<b>18</b>
1.2.1 Definiciones	18
1.2.1.1 Aislantes eléctricos	18
1.2.1.2 Dieléctricos	18
1.2.2 Polarización	18
1.2.3 Pérdidas	22
1.2.3.1 Pérdidas por conductividad	22
1.2.3.1.1 Resistividad	23
1.2.3.1.1.1 Resistividad interna o volumétrica.	23
1.2.3.1.1.2 Resistividad superficial.	24
1.2.3.1.2 Resistencia de aislación	24
1.2.3.2 Pérdidas dieléctricas	25
1.2.3.2.1 Circuito equivalente	25
1.2.3.2.2 Factor de potencia	25
1.2.3.2.3 Factor de disipación	25
1.2.3.2.4 Rigidez dieléctrica	26
1.2.4 Clasificación de los materiales no conductores	26
1.2.5 Breve descripción de algunos materiales no conductores	27
1.2.5.1 Caucho	27
1.2.5.1.1 Caucho natural	27
1.2.5.1.2 Caucho sintético	28
1.2.5.2 Ebonita	28
1.2.5.3 Papel	29
1.2.5.3.1 Papel no impregnado	29
1.2.5.3.2 Papel impregnado	30
1.2.5.3.3 Algunos de los principales tipos de papeles aislantes	30
1.2.5.4 Fibras textiles	30
1.2.5.5 Resinas	31
1.2.5.5.1 Resinas naturales	31
1.2.5.5.2 Resinas artificiales	31
1.2.5.5.3 Resinas sintéticas	32
1.2.5.5.3.1 Resinas termofraguantes o termoendurecibles	32
1.2.5.5.3.1.1 Resinas fenólicas	32
1.2.5.5.3.1.2 Aminoresinas	34
1.2.5.5.3.2 Resinas termoplásticas	34
1.2.5.6 Ceras	36
1.2.5.6.1 Ceras minerales	36
1.2.5.6.2 Ceras sintéticas	36
1.2.5.7 Aceites	36

1.2.5.7.1 Aceites minerales	36
1.2.5.7.2 Aceites sintéticos	37
1.2.5.7.3 Aceites vegetales	37
1.2.5.8 Barnices	37
1.2.5.9 Esmaltes	38
1.2.5.10 Siliconas	38
1.2.5.10.1 Aceites de siliconas	39
1.2.5.10.2 Cauchos de silicona	39
1.2.5.10.3 Resinas de silicona	39
1.2.5.10.4 Mezclas de siliconas	39
1.2.5.11 Mica	39
1.2.5.12 Vidrio	40
1.2.5.13 Materiales cerámicos	41
1.2.5.13.1 Materiales cerámicos de baja constante dieléctrica	41
1.2.5.13.2 Materiales cerámicos de alta constante dieléctrica.	41
1.2.5.14 Materiales piezoeléctricos	42
<b>2 Capítulo II</b>	<b>49</b>
<b>2.1 Materiales magnéticos</b>	<b>49</b>
2.1.1 Propiedades magnéticas	49
2.1.2 Pérdidas en los materiales magnéticos	53
2.1.3 Descripción y clasificación de los materiales magnéticos	55
2.1.3.1 Materiales para campos magnéticos continuos	57
2.1.3.2 Materiales para campos magnéticos alternos	57
2.1.3.3 Materiales para imanes permanentes	61
2.1.3.4 Cintas magnéticas	63
<b>2.2 Circuito Magnético</b>	<b>64</b>
2.2.1 Circuitos eléctricos	65
2.2.2 Circuitos magnéticos	67
<b>2.3 Núcleo de Inductores y transformadores</b>	<b>70</b>
2.3.1 Laminaciones	70
2.3.2 Imanes permanentes	74
2.3.2.1 Proyecto de un imán permanente	75
2.3.2.1.1 Geometría del imán	77
2.3.2.1.2 Recta de carga	77
2.3.2.1.3 Factores de corrección	77
2.3.2.2 Imanes en circuitos dinámicos	78
<b>3 Capítulo III</b>	<b>81</b>
<b>3.1 El calor y la sobreelevación de temperatura</b>	<b>81</b>
3.1.1 Conducción	81
3.1.2 Radiación	82
3.1.3 Convección	83
3.1.4 Radiación y convección	84
3.1.5 Calculo de la sobreelevación de temperatura	85
3.1.6 Diagrama de transferencia de calor por radiación y convección	86
<b>4 Capítulo IV</b>	<b>87</b>
<b>4.1 Alambres y Cables</b>	<b>87</b>
4.1.1 Definiciones	87
4.1.2 Clasificación	87
4.1.2.1 Conductores para conexiones	87
4.1.2.2 Conductores destinados a arrollamientos	89
4.1.3 Aislamiento de los conductores	89
4.1.3.1 Aislamientos mediante fibras	89
4.1.3.2 Aislamiento con materiales plásticos o caucho	90
4.1.3.3 Aislamiento mediante esmaltado	91
4.1.4 Dimensiones de los alambres – Calibres	91
4.1.4.1 Conversión de medidas	92

4.1.4.2 American Wire Gauge	92
4.1.5 Resistencia en radiofrecuencia	93
4.1.5.1 Efecto pelicular	93
4.1.5.1.1 Espesor de la película y resistencia a frecuencias muy elevadas	93
4.1.5.2 Efecto de proximidad	96
4.1.5.3 Hilo de Litz	96
<b>5 Capítulo V</b>	<b>97</b>
<b>5.1 Resistores</b>	<b>97</b>
5.1.1 Clasificación	98
5.1.1.1 Resistores fijos	98
5.1.1.1.1 Valor y Tolerancia	98
5.1.1.1.2 Valores Normalizados (o preferidos)	98
5.1.1.1.3 Tamaño y Disipación	98
5.1.1.1.4 Estabilidad	99
5.1.1.1.5 Temperatura Máxima de trabajo	99
5.1.1.1.6 Coeficiente de temperatura	99
5.1.1.1.7 Tensión máxima de trabajo	100
5.1.1.1.8 Coeficiente de tensión	100
5.1.1.1.9 Ruido	100
5.1.1.1.9.1 Ruido de corriente (Ruido Berramont)	100
5.1.1.1.9.2 Ruido Térmico (Ruido de Johnson)	100
5.1.1.1.10 Estabilidad durante el almacenamiento (1 año)	101
5.1.1.2 Resistores Variables	101
5.1.1.2.1 Características	102
<b>6 Capítulo VI</b>	<b>105</b>
<b>6.1 Capacitores</b>	<b>105</b>
6.1.1 Clasificación	105
6.1.2 Capacitores variables	105
6.1.2.1 Ejemplos prácticos	109
<b>7 Capítulo VII</b>	<b>113</b>
<b>7.1 Inductores</b>	<b>113</b>
7.1.1 Inductores con núcleo de aire, de una sola capa (solenoides)	116
7.1.1.1 Otras expresiones simplificadas	117
7.1.1.2 Proyecto de inductores con núcleo de aire de una sola capa	118
7.1.1.2.1 Datos	118
7.1.1.2.2 Planteo	118
7.1.1.2.3 Desarrollo	118
7.1.2 Inductores con núcleo de aire multicapas	122
7.1.2.1 Verificación de inductores multicapas	127
7.1.2.2 Proyecto de inductores multicapas:	127
7.1.2.2.1 Datos	127
7.1.2.2.2 Planteo	127
7.1.2.2.3 Desarrollo	127
7.1.3 Inductores con núcleo de material magnético	128
7.1.4 Inductores con núcleo de hierro laminado	129
7.1.4.1 Relaciones fundamentales	130
7.1.4.2 Verificación de inductores con núcleo de hierro sin circulación de c.c.	130
7.1.4.2.1 Datos	131
7.1.4.2.2 Planteo	131
7.1.4.2.3 Desarrollo	131
7.1.4.3 Proyecto de inductores con núcleo de hierro sin circulación de c.c.	132
7.1.4.3.1 Datos	132
7.1.4.3.2 Planteo	133
7.1.4.3.3 Desarrollo	133
7.1.4.4 Inductores con núcleo de hierro laminado y circulación de c.c. y c.a. superpuestas	134
7.1.5 Método de Hanna	136
7.1.5.1 Proyecto de inductores con el método de Hanna	138
7.1.5.1.1 Datos	138

7.1.5.1.2 Desarrollo	138
7.1.6 Método las curvas M	139
7.1.6.1 Proyecto de inductores con el método de las curvas M	143
7.1.6.1.1 Datos	143
7.1.6.1.2 Desarrollo	143
7.1.7 Proyecto de inductores de elevado Q	144
<b>8 Capítulo VIII</b>	<b>147</b>
<b>8.1 Transformadores</b>	<b>147</b>
8.1.1 Transformadores con núcleo de hierro laminado	147
8.1.2 Transformadores de alimentación	149
8.1.3 Transformadores de audiofrecuencia	157
8.1.3.1 Transformadores de potencia	158
8.1.3.1.1 Proyecto de un transformador de salida	160
8.1.3.2 Transformadores de tensión	162
<b>9 Capítulo IX</b>	<b>165</b>
<b>9.1 Blindajes</b>	<b>165</b>
9.1.1 Blindaje de campos magnéticos	165
9.1.1.1 Blindajes Magnéticos	165
9.1.1.2 Blindajes conductores	167
9.1.2 Blindaje de campos eléctricos	170
<b>9.2 Disipadores de calor</b>	<b>171</b>
9.2.1 Efecto de la temperatura en los semiconductores	171
9.2.1.1.1 Problema	173
9.2.1.1.2 Desarrollo	173
9.2.1.2 Curvas de reducción de los valores nominales	174
9.2.1.2.1 Problema	174
9.2.1.2.2 Problema	175
9.2.1.2.3 Problema	175
9.2.1.2.4 Problema	175
9.2.1.3 Semiconductores de potencia	175
9.2.1.3.1 Problema	176
9.2.1.3.2 Problema	176
9.2.1.3.3 Problema	176
<b>10 Capítulo X</b>	<b>177</b>
<b>10.1 Proyecto de inductores o trafos con c.c. y c.a. Superpuestas</b>	<b>177</b>
10.1.1 Determinación, mediante computadora, de los gráficos necesarios para realizarlos	177
10.1.1.1 Introducción	177
10.1.1.2 Método para determinar las curvas	177
10.1.1.3 Curvas finales	181

# 1 CAPÍTULO I

**Materiales eléctricos:** Una propiedad común a prácticamente todos los materiales, es la de permitir, en algún grado, la conducción de la corriente eléctrica, pero así como algunos materiales son buenos conductores, otros son malos conductores de dicha corriente.-

Desde este punto de vista, los materiales pueden clasificarse en **conductores y no conductores**.-

Un material es conductor cuando puede desempeñar esa función en un circuito, independiente del valor de su conductividad.-

Un material es no conductor cuando el paso de la corriente a través de le es tan bajo que puede despreciarse.-

Existen también los llamados **semiconductores**, que tienen valores de conductividad intermedios, además de características particulares como coeficiente térmicos de resistividad negativo, etc.-

## 1.1 Materiales conductores

Los conductores en general pueden clasificarse en: metálicos, electrolíticos y gaseosos.-

En los conductores metálicos la conducción es electrónica, es decir, los portadores de cargas son electrones libres. Pertenecen a este grupo los metales y aleaciones. Se suele hablar en estos casos de conducción metálica.-

En los conductores electrolíticos la conducción es iónica; pertenecen a este grupo los llamados electrolitos, es decir, los ácidos (bases o sales, disueltos o fundidos). Las moléculas de estas sustancias, cuando se disuelven o funden, se disocian total o parcialmente formando iones positivos o negativos, y estos iones son portadores de cargas. En estos casos, el paso de la corriente eléctrica corresponde a un desplazamiento de material, y viene acompañada de una reacción química.-

En los conductores metálicos la electricidad circula a través de la materia, mientras que en los conductores electrolitos circula con la materia.-

Los gases pertenecen a un tercer grupo de conductores, los conductores gaseosos; en estado normal, los gases no son conductores, pero pueden convertirse relativamente en buenos conductores cuando están ionizados.-

Normalmente no se utilizan los gases para conducir corriente, salvo en casos muy especiales. La conducción a través de los gases no cumple con la Ley de Ohm. En este capítulo se analizarán solamente los materiales conductores metálicos.-

### 1.1.1 Principales propiedades y características de los materiales conductores

1. Conductividad eléctrica (Resistividad eléctrica).
2. Coeficiente térmico de resistividad.
3. Conductividad térmica.
4. Fuerza electromotriz.
5. Resistencia mecánica.

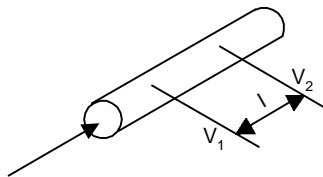
#### 1.1.1.1 Conductividad eléctrica $S_e$ (Resistividad eléctrica $r_e$ )

La conductividad eléctrica es una propiedad vinculada a la corriente eléctrica que puede fluir por un material cuando este está sometido a un campo eléctrico.-

Generalmente la densidad de corriente  $J$  es proporcional al campo eléctrico:

$$J = S_e \cdot E = \frac{E}{r_e}$$

La constante de proporcionalidad  $\sigma_e$  es la conductividad eléctrica; y su recíproca  $\rho_e$  es la resistividad eléctrica.-



**Figura 1-1**

Sea un conductor de sección transversal constante  $S$  por el cual circula una corriente  $I$  siendo  $V=(V_1-V_2)$  la diferencia de potencial entre dos puntos separados una distancia  $l$ . La densidad de corriente  $J$  y el campo eléctrico  $E$  en la barra están dados por:

$$J = \frac{I}{S}$$

$$E = \frac{(V_1 - V_2)}{l}$$

por lo tanto,

$$J = \frac{I}{S} = \sigma_e \cdot E = \sigma_e \cdot \frac{(V_1 - V_2)}{l}$$

Comparando esta expresión con la forma más usual de la Ley de Ohm se obtiene:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{(V_1 - V_2)}{\frac{l}{S \sigma_e}}$$

de donde

$$R = \frac{l}{S \sigma_e} = r_e \frac{l}{S}$$

La resistencia eléctrica es una función de la geometría del elemento, pero la resistividad  $\rho_e$  es una constante del material.-

La resistencia se mide en ohmios. La resistividad se mide en:

$$r_e = \frac{R \cdot S}{l} \left[ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

#### **1.1.1.2 Coeficiente térmico de resistividad a**

El coeficiente térmico de resistividad es una magnitud que caracteriza la variación de la resistencia en función de la temperatura.-

El valor de la resistencia de un elemento a una temperatura  $t_2$  puede expresarse como:

$$R_{t_2} = R_{t_1} [1 + \alpha(t_2 - t_1)] = R_{t_1}(1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

siendo:

$R_{t_1}$ : valor de la resistencia a temperatura  $t_1$ .

$t_2 - t_1$ : salto térmico.

$\alpha$ : coeficiente térmico de resistividad.

despejando  $\alpha$



$$a = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{R_{t_1} \cdot \Delta t} \left[ \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

El coeficiente térmico de resistividad es el aumento de resistencia por unidad de resistencia y por grado de variación de temperatura.-

En los metales, el coeficiente térmico de resistividad es positivo.-

<i>Material</i>	<i>Resistividad °C cm/W</i>	<i>Conductibilidad W/°C cm</i>	<i>Capacidad calorífica específica J/cm² °C</i>
Cobre	0,28	8,6	6,8
Aluminio	0,75	1,3	8,3
Hierro batido	1,8	0,79	3,7
Chapa de acero al carbón	2,3	0,43	3,7
Hierro colado	2,5	0,30	3,7
Acero al silicio (longitudinal)	5,8	0,17	3,7
Acero al silicio (transversal)	38-130	0,003	3,7
Mica (transversal)	360	0,002	2,0
Batista barnizada	500	0,002	1,4
Goma	640	0,002	...
Cartón prensado, aceitado	640	0,002	1,4
Ladrillo	1000	0,001	...
Cartón prensado, seco	1000-1300	0,0008-0,001	...
Tejido sin tratar o fieltro	150	0,000063	...

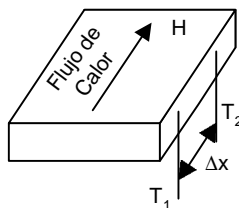
**Tabla 1-1. Propiedades térmicas aproximadas de algunos materiales.**

La conductividad térmica es el calor que circula, en la unidad de tiempo, entre dos caras opuestas de un volumen (de dimensiones unitarias) por unidad de diferencia de temperatura entre las caras.-

### 1.1.1.3 Conductividad térmica $S_q$

El elemento tiempo se halla incluido en la unidad de medida de potencia [watt], que es la energía por unidad de tiempo.-

La conductividad térmica  $\sigma_0$  y el gradiente de temperatura  $\partial T / \partial x$  son los factores que determinan el régimen de transmisión de calor a través de un sólido.-



**Figura 1-2**

Si se supone una muestra de sección constante  $S$  en la que se tiene un flujo de calorías por unidad de tiempo  $H$  (Figura 1-2) se puede escribir que:

$$Q = \frac{H}{S} \equiv -S_q \frac{\partial T}{\partial x}$$

El signo menos indica que el calor fluye de las temperaturas altas a las bajas.-

Puede observarse que la ecuación de conducción del calor es similar a la de la conducción eléctrica.-

En los metales, a temperatura ambiente, la buena conductividad térmica va siempre acompañada de una buena conductividad eléctrica debido a que la transmisión de calor en los mismos, se debe principalmente a los electrones libres.-

La resistividad térmica es la recíproca de la conductividad, y se expresa en  $[\text{°C}\cdot\text{cm}/\text{watt}]$ .-

La capacidad calórica específica de un material es la energía calórica acumulada en la unidad de volumen por unidad de elevación de temperatura y puede expresarse en  $[\text{Joules}\cdot\text{cm}^3/\text{°C}]$ .-

#### 1.1.1.4 Fuerza termoelectromotriz

Se denomina fuerza termoelectromotriz a una fuerza electromotriz que se genera en circuitos formados por dos conductores de distintos materiales **a** y **b** cuando los correspondientes puntos de unión **1** y **2** (Figura 1-3) se encuentran a diferentes temperaturas.-

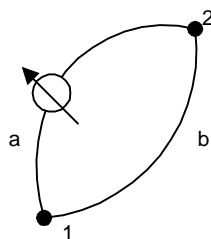


Figura 1-3. Par Termoeléctrico.

Esta fuerza electromotriz inducida térmicamente se denomina también **potencial de Seebeck**.-

Substancia	Termotensión $\text{mV}/100\text{°C}$	Substancia	Termotensión $\text{mV}/100\text{°C}$
Bismuto	- 6,5	Iridio	+ 0,65
Constantán	- 3,5	Plata	+ 0,7
Cobalto	- 1,7	Cinc	+ 0,7
Níquel	- 1,5	Oro	+ 0,7
Paladio	- 0,5	Cobre	+ 0,75
Sodio	- 0,2	Wolframio	+ 0,8
Torio	- 0,1	Acero V 2 A	+ 0,8
Mercurio	$\pm 0,0$	Cadmio	+ 0,9
Platino	$\pm 0,0$	Latón	+ 1,1
Carbón	$\pm 0,3$	Molibdeno	+ 1,2
Estaño	+ 0,4	Hierro	+ 1,8
Plomo	+ 0,4	Niquel-cromo	+ 2,3
Magnesio	+ 0,4	Antimonio	+ 4,3
Aluminio	+ 0,4	Silicio	+ 45
Manganina	+ 0,6	Teluro	+ 50
Rodio	+ 0,65		

Tabla 1-2. Serie de tensiones termoelectricas referidas al platino (tensiones medias para el dominio de temperatura comprendida entre  $0\text{°C}$  y  $100\text{°C}$ ; en la soldadura caliente la corriente se dirige del bismuto al platino; es decir, el lado del platino es el mas positivo.

La tensión que aparece entre dos materiales se obtiene como diferencia entre los valores correspondientes que figuran en la tabla; por ejemplo: en el caso constantán<sup>1</sup> - cobre se tiene:

$$-3,5 - (+0,75) = -4,25$$

Cuando se miden tensiones e intensidades pequeñas, si en el circuito de medición hay puntos de unión de metales diferentes, pueden surgir fuerzas termoelectromotrices que pueden alterar los resultados de la lectura.-

La fuerza termoelectromotriz se usa a menudo para medir temperaturas. En este caso, el conjunto de los conductores se denomina **termopar**.-

<sup>1</sup> Aleación de Cobre y de Níquel cuya resistencia eléctrica es prácticamente independiente de la temperatura.

<i>termopar</i>	<i>Material</i>	<i>Polo</i>	<i>Límite aproximado de temperatura</i>	<i>Fuerza termoelectromotriz a 100°C</i>
Cu-Constantán	Cobre	+	400°C	4,25 mV
	Constantán	-		
Fe-Constantán	Hierro	+	600°C	4,25 mV
	Constantán	-		
NiCr-Constantán	Nicromo <sup>2</sup>	+	700°C	5,3 mV
	Constantán	-		
NiCr-Ni	Nicromo	+	900°C	5,7 mV
	Níquel	-		
PtRh-Pt	Platino-rodio	+	1300°C	3,7 mV
	Platino	-		

**Tabla 1-3. Termopares normalizados.**

Para temperaturas altas se usan termopares de: 90%platino-10%rodio (9,5mV a 1000°C); molibdeno-wolframio (con 1% de hierro) (16mV a 2000°C); carbón-silita (54mV a 1800°C); etc.-

#### **1.1.1.5 Resistencia mecánica**

Al seleccionar un conductor, además de considerar sus propiedades eléctricas, muchas veces es necesario tener en cuenta la resistencia mecánica del mismo.-

Por efecto de una fuerza convenientemente aplicada, un material se alarga. Si se designa con  $l_1$  la longitud inicial, y con  $l_2$  la longitud final, la diferencia:

$$l_1 - l_2 = \Delta l$$

$$\frac{l_1 - l_2}{l_1} = e$$

donde  $\Delta l$  se llama alargamiento absoluto y  $e$  es el alargamiento relativo.-

La fuerza que provoca la ruptura se llama carga de ruptura, y la relación entre esta carga y la sección transversal se llama resistencia límite a la ruptura.-

$$r_r = \frac{\text{carga de ruptura}}{\text{sección transversal}}$$

#### **1.1.2 Diversos tipos de materiales conductores**

Entre los materiales conductores pueden distinguirse dos grupos: **Materiales de alta conductividad** (baja resistividad), y **Materiales de alta resistividad** (baja conductividad).-

Al primer tipo corresponden materiales que se emplean, fundamentalmente, para transportar corriente eléctrica con baja pérdida; ejemplos típicos son algunos materiales como: la plata, el cobre, el aluminio y algunas aleaciones como el bronce o el latón.-

Al segundo grupo corresponden materiales que se emplean, fundamentalmente, para producir caídas de potencial, y se utilizan, por ej., en la construcción de resistores, elementos de absorción o regulación de energía, lámparas incandescentes, etc.-

##### **1.1.2.1 Materiales conductores de alta conductividad**

Los materiales de alta conductividad más típicos son: la plata ( $\rho=0,016$ ), el cobre ( $\rho=0,0172$  a  $0,0175$ ) y el aluminio ( $\rho=0,026$  a  $0,028$ ).-

<sup>2</sup> El nicromo es algo inestable entre 600°C y 700°C debido a un punto de transformación en la aleación.-

- **Plata ( $\rho=0,016 \alpha=0,0036$ )**

La plata es, de los materiales conocidos, el más conductor (un 10% más que el cobre que ocupa el segundo lugar), pero su uso como material eléctrico es muy limitado debido a su elevado costo. Se encuentra en la naturaleza bajo la forma de: sulfuros, cloruros o plata nativa; para obtener plata químicamente pura, una vez elaborada, se la refina por vía generalmente electrolítica.-

La plata es un material muy maleable y dúctil, que puede soldarse a sí misma por martilleo (batido), a una temperatura inferior a la de fusión (temperatura de fusión:  $960^{\circ}\text{C}$ ); su dureza no es muy elevada, y se haya comprendida entre la del oro y el cobre. La plata recocida es algo más conductora que la plata batida.-

Como material conductor se emplea: en fusibles (para cortocircuitos eléctricos), fundamentalmente por su alta conductividad, su inoxidable y su precisión para la fusión; en contactos de interruptores o relevadores para bajas intensidades, por su alta conductividad eléctrica y térmica; en instrumentos médico eléctricos (termocauterio); etc..-

- **Cobre ( $\rho=0,072-0,0175 \alpha=0,0036$ )**

El cobre es el material de uso mas generalizado como conductor eléctrico, debido a su conductividad elevada y a su costo moderado. Es un elemento muy difundido en la naturaleza, corrientemente se encuentra bajo la forma de: sulfuros, óxidos o carbonatos, excepcionalmente como cobre nativo (USA). El cobre puro (cobre electrolítico), se obtiene por refinado electrolítico. Un electrodo de cobre puro oficia de cátodo, y uno de cobre impuro, de ánodo. El cobre electrolítico se deposita sobre el cátodo.-

El cobre es un metal altamente maleable y dúctil, que puede ser fundido, forjado, laminado, estirado y trabajado. El trabajo mecánico lo endurece, pero el recocido lo devuelve a su estado dulce. Tiene una elevada resistencia a la tracción, una gran estabilidad a la corrosión, y es fácil de estañar y de soldar.-

El cobre recocido ha sido objeto de acuerdos internacionales, de los cuales se extractan algunos puntos importantes:  
(valores normales a  $20^{\circ}\text{C}$ ).

- Resistividad:  $1/58=0,017241 [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$ .
- Coeficiente térmico de resistividad:  $0,00393$ .
- Densidad:  $8,99 [\text{g}/\text{cm}^3]$
- Coeficiente de dilatación lineal:  $0,000017 [\text{m}/^{\circ}\text{C}]$ .
- Densiresistividad:  $1/(58 \cdot 8,99) = 0,15328... [\Omega \cdot \text{g}/\text{m}^2]$

La presencia de impurezas disminuye considerablemente la conductividad del cobre puro.-

Con el objeto de mejorar las cualidades mecánicas del cobre, se le adicionan otros elementos formando aleaciones, como el bronce y el latón.-

- El **bronce** es una aleación de cobre y estaño (generalmente con un 80% a un 95% de Cu), que se caracteriza por su tenacidad y dureza). Suele usarse como conductor eléctrico, pese a que su conductividad eléctrica es inferior a la del cobre. Los broncees modernos, son frecuentemente aleaciones ternarias o cuaternarias (otros elementos componentes de la aleación suelen ser: el fósforo, el silicio, el magnesio, el berilio, el cadmio, etc.); algunos broncees llevan el nombre del elemento que se les adiciona (ejemplo: bronce fosforoso, bronce al silicio, etc.).-
- El **latón** es una aleación de cobre (50% a 70%) y zinc (30% a 50%), a los que se les agrega, a veces, otros materiales (estaño, plomo, hierro), pero en pequeñas cantidades. Se caracteriza por la facilidad con que puede ser estirado y estampado y se usa como material conductor, pese a que su conductividad eléctrica es inferior a la del cobre.-

Cuando se requieren conductores de elevada resistencia mecánica, se suelen utilizar el hierro o el acero, recubiertos de una película protectora y muy conductora de cobre; poseen como ventaja la gran resistencia propia del hierro o el acero, combinada con la elevada conductividad del cobre. Ejemplo: "Copper-Weld".-

- **Aluminio ( $\rho=0,026-0,028$   $\alpha=0,00403-0,00429$ )**

El aluminio ocupa el tercer lugar por sus conductividad, después de la plata y el cobre. La conductividad del aluminio es sólo un 63% de la conductividad del cobre, pero a igualdad de longitud y peso tiene el doble de conductancia.-

Se lo obtiene de la bauxita, mineral abundante y muy distribuido en el globo.-

El aluminio es un material más blando que el cobre. Su resistencia a la tracción es mucho menor, y su soldadura presenta dificultades, pero es un material dúctil que puede ser trabajado fácilmente por laminado, estirado, hilado, extrusión<sup>3</sup> y forjado. Está siempre cubierto por una capa delgada e invisible de óxido, que es impermeable y protectora. El aluminio expuesto a la atmósfera ordinaria, tiene estabilidad y larga vida. Para aumentar su resistencia mecánica se le agrega silicio, magnesio, hierro, etc., obteniéndose diversas variaciones de uso eléctrico. Ejemplo: almenec, aldrey, etc..-

En las aplicaciones eléctricas, el aluminio está sustituyendo cada vez mas al cobre, debido fundamentalmente a que los minerales de cobre se van agotando y sube el precio de éste metal.-

Metales	Densidad en g/cm <sup>2</sup>	Temperatura de fusión en °C	Límite de resistencia a la ruptura en Kg/mm <sup>2</sup>	Resistencia eléctrica específica en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Coefficiente térmico 1/°C
Aluminio	2,69-2,7	657-660	8-25	0,026-0,028	0,0043-0,00429
Bronce	8,3-8,9	885-1.050	31-135	0,02-0,05	0,004
Oro	19,3-20,0	3,370±50	100-300	0,053-0,055	0,004-0,005
Latón	8,4-8,7	900-960	30-70	0,031-0,079	0,0022
Cobre	8,7-8,9	1.083	27-44,9	0,0172-0,0175	0,004
Molibdeno	10,2	2.570-2.630	80-250	0,048-0,054	0,0047-0,005
Níquel	8,8-8,9	1,452	40-70	0,070-0,079	0,006
Estaño	7,8	232	2-5	0,11-0,12	0,0043-0,0044
Platino	21,4	1.773	15-35	0,09-0,1	0,0025-0,0039
Mercurio	13,55	-38,9	-	0,958	0,000
Acero	7,8	1.400-1.530	70-75	0,103-0,137	0,057-0,006
Plata	10,5	960,5	15-30	0,016-0,0162	0,034-0,0036
Plomo	11,34	327,4	0,95-2,0	0,217-0,222	0,0038-0,004
Zinc	7,1	419,4-430	14-29	0,05-0,06	0,0039-0,041
Hierro fundido	7,2-7	1.200	12-32	0,4-1,4	0,0009-0,001

Tabla 1-4. Principales características de aleaciones y metales.

### 1.1.2.2 Materiales conductores de alta resistividad

Este grupo está compuesto de aleaciones de alta resistividad. Estas aleaciones tienen composiciones muy variadas y se encuentran en el mercado bajo distintas denominaciones. Los principales elementos empleados en estas aleaciones son: cobre, cromo, hierro, níquel, manganeso, aluminio, zinc, silicio, etc..-

Algunas aleaciones son muy resistentes a la temperatura y a la corrosión; al respecto, es interesante destacar que al calentar un metal, se forma sobre su superficie una película de óxido.-

En metales como el cobre, el hierro, el cobalto, etc., esta película de óxido es porosa, y por lo tanto no protege al metal que se destruye fácilmente si se lo sigue calentando.-

En metales como el níquel, el cromo y el aluminio, la película de óxido que se forma durante el calentamiento es muy densa y los protege contra la destrucción ulterior. Por eso estos metales sirven muy bien como base para

<sup>3</sup> Acción de dar a un material moldeable la forma de un perfil de sección recta constante.

preparar aleaciones resistentes al calor.-

Las principales aleaciones de alta resistividad son:

- **Aleaciones de cobre y níquel**

Son aleaciones que poseen coeficientes de resistividad relativamente bajos respecto a otras aleaciones (alrededor de  $0,5\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ ).-

Una aleación de este tipo es el constantán (60%cobre - 40%níquel).

Esta aleación tiene una elevada **f.e.m.** respecto al cobre, por lo que no es adecuada para instrumentos de medida de precisión, pese a tener un bajo coeficiente de temperatura.-

Añadiendo zinc a la aleación cobre-níquel, se obtiene el argentan que tiene  $0,37\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ , y un elevado coeficiente de temperatura.-

Con la adición de manganeso, se obtiene la niquelina (67%Cu-31%Ni-2%Mn aproximadamente), que tiene  $0,40\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$  y coeficiente de temperatura y **f.e.m.** respecto al Cu, prácticamente despreciables, por lo que se emplean en los instrumentos de precisión.-

- **Aleaciones de níquel y cromo**

Son aleaciones que poseen coeficientes de resistividad más elevados (alrededor de  $1\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ ), coeficientes de temperatura bajos y pequeñas **f.e.m.** con respecto al Cu. Son aleaciones adecuadas para trabajar a temperaturas elevadas ( $1.000^{\circ}\text{C}$  o algo mas), pues el conductor se recubre de una capa de óxido que lo protege del ulterior ataque del oxígeno.-

Las aleaciones níquel-cromo se encuentran en el mercado con distintas denominaciones comerciales.-

Con la adición de hierro, se obtiene un aumento de la resistividad y menor costo, pero los conductores no son aptos para trabajar a temperaturas superiores a los  $800^{\circ}\text{C}$ , y a veces presentan fenómenos de oxidación.-

Para temperaturas de hasta  $1.350^{\circ}\text{C}$  se fabrican aleaciones de hierro, aluminio, cromo y cobalto (kanthal).-

Del análisis de las aleaciones estudiadas se observa que el cobre interviene en la mayor parte de las aleaciones empleadas a temperatura ordinaria; que el níquel les confiere mayor resistividad y que el cromo les asegura resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas y protección contra los ataques de los agentes químicos.-

Por razones de costo, algunas veces se reemplaza el Ni por el Zn o el Fe.-

#### **1.1.2.2.1 Característica y clasificación de las aleaciones de alta resistividad**

En general, las características mas importantes a tener en cuenta en las aleaciones de alta resistividad son:

- Alta resistividad.
- Bajo coeficiente térmico de resistividad.
- Resistencia a la corrosión.
- Constancia en el tiempo.
- Pequeña fuerza termoelectromotriz con respecto al cobre.
- Alto punto de fusión.
- Ductibilidad, maleabilidad y soldabilidad.

La importancia de cada una de estas características varía según el uso al que está destinada la aleación.-

Las aleaciones de alta resistividad suelen agruparse en tres clases:

**Clase A** Aleaciones para resistores de precisión (cajas de resistencia, resistores patrones, etc.).

**Clase B** Aleaciones para resistores comunes (resistores y reóstatos).

**Clase C** Aleaciones para elementos electrotérmicos (hornos, etc.).

Este último grupo suele subdividirse, según la temperatura máxima de uso, en subclases:

- ✓ **Subclases C<sub>1</sub>:** temperatura máxima 350°C
- ✓ **Subclases C<sub>2</sub>:** temperatura máxima 500°C
- ✓ **Subclases C<sub>3</sub>:** temperatura máxima 700°C
- ✓ **Subclases C<sub>4</sub>:** temperatura máxima 900°C
- ✓ **Subclases C<sub>5</sub>:** temperatura máxima 1100°C
- ✓ **Subclases C<sub>6</sub>:** temperatura máxima 1300°C

A las aleaciones de **clase A**, Ej.: **Manganita**(84%Cu 12%Mg 4%Ni), se les exige:

- Alta resistividad.
- Pequeña fuerza termoelectromotriz, con otros metales (sobre todo cobre).
- Coeficiente térmico de resistividad próximo a cero.
- Constancia en el tiempo.
- Alta estabilidad contra la corrosión.

A las aleaciones de **clase B**, Ej.: **Constantán** (Cu-Ni) y **Niquelina** (Cu-Ni-Mg) y en general aleaciones a base de cobre, se les exige fundamentalmente:

- Alta resistividad.
- Poco costo.
- Pequeño coeficiente térmico de resistividad.

A las aleaciones de **clase C**, Ej.: **Nicromo** (Ni-Cr), **ferronicromo**, aleación **ferro-cromo-aluminio**, **cromal** (Cr-Al), **kanthal** (Fe-Cr-Al-Co), se les exige fundamentalmente:

- Alta resistividad
- Poco costo
- Resistencia mecánica
- Elevado punto de fusión
- Resistencia a la oxidación y corrosión.

Cabe recordar que en atmósferas sulfurosas no se deben emplear las aleaciones con Ni para evitar la corrosión.-

Aleación	Densidad en g/cm <sup>3</sup>	Temperatura de fusión en °C	Límite de resistencia a la ruptura en Kg/mm <sup>2</sup>	Resistencia específica en Ω.mm <sup>2</sup> /m	Coeficiente térmico 1/°C	Termo-f.e.m. de la aleación conjuntamente con cobre en μV/°C	Temperatura máxima de calentamiento en °C
Constantán	8,7-8,9	1.200-1.275	40-55 65-70	0,45-0,48 0,46-0,52	5x10 <sup>-6</sup>	39-62	450-50
Manganina	8,14-8,4	920-960	45-55 60-70	0,42-0,48 0,43-0,5	(3-6)x10 <sup>-5</sup>	0,9-1,0	250-300
Plata alemana	8,8-8,5	1.030	35-40 45-53 55-60	0,30-0,35 0,40-0,45	(28-30)x10 <sup>-5</sup>	14-16	200-250
Nicromo (aleación con 15% de cromo y 60% de níquel)	8,2-8,25	1.880-1.890	55-65	1,02-1,18	0,17x10 <sup>-3</sup>	----- ---	1,000
Nicromo (aleación con 20% de cromo y 30 de níquel)	8,4	1.400	60-70	1,02-1,27	0,15x10 <sup>-9</sup>	----- ----	1,050

**Tabla 1-5. Principales características de aleaciones de alta resistividad.**

### 1.1.2.2.2 Otros materiales usados como conductores resistivos (los carbones)

Los carbones, en rigor de semiconductores, son muy usados como conductores resistidos. Se emplean en la fabricación de: resistores, electrodos para hornos eléctricos, elementos calefactores para temperaturas del orden de 1000°C a 2000°C, micrófonos, electrodos para pilas, escobillas para motores eléctricos, etc..-

Los carbones se presentan en dos formas: la amorfa y la cristalina. Ésta última comprende el diamante y el grafito<sup>4</sup>.-

Entre las variedades del carbón amorfo podemos mencionar: el carbón de leña, el coque, el negro de humo, el negro animal, etc.. El carbón de piedra es una variedad impura del carbón amorfo.-

La materia prima (coque pulverizado, grafito natural, negro de humo, etc.) que se usa en la producción de elementos de carbón para uso eléctrico, se tritura, se tamiza, y se mezcla con aglutinantes (alquitrán de hulla, resinas, arcillas, vidrio líquido, etc.); la masa así preparada se estira a través de boquillas o se prensa en formas especiales, y posteriormente se somete a cocción (800°C a 3000°C).-

Aleación	Resistividad a 20 °C n.mm <sup>2</sup> /m	Resistencia relativa al Cobre	Coficiente de temperatura por °C
Argentán (60,16Cu + 25,37Zn + 14,07Ni + 0,3Fe)	0,37	21,5	0,00017
Constantán (60Cu + 40Ni)(Advance, eureka)	0,49	28,5	0,00003
Cromo Silicio (20Cr + 2Si + 5Mn + 73Fe)	0,75	43,5	
Evanohm(Karma)(73Ni + 20Cr + Al + Fe)	1,5	87,2	0,00015
Kanhtal Al(72Fe + 20Cr + 5Al + 3Co)	1,45	84,3	0,00006
Isabelina (84Cu + 13Mn + 3Al)	0,50	28	-0,00002
Manganina (84Cu + 4Ni + 12Mn)	0,44	25,6	0,00002
Megapir I(65Fe + 30Cr + 5Al)	1,4	81,5	0,000025
Midohm (23Ni + 77Cu)	0,3	17,4	0,00018
Nichrom III(80Ni + 20Cr)	1,03	60,0	0,00011
Nichrom IV(85Ni + 15Cr)	0,89	51,8	0,00011
Niquelcromo Ferro I (70Ni + 20Cr + 8Fe + 2Mn)	1,11	64,5	0,0001
Niquelcromo II (63Ni + 15Cr + 20Fe + 2Mn)	1,12	65	0,00013
Niquelcromo III (20Ni + 20Cr + 48,5Fe + 3Mn + 0,5Si)	1,03	60	0,0003
Niquelina (67Cu + 31Al + 2Mn)	0,40	23,2	0,0001
Nuevo Konstan (82,5Cu + 12Mn + 4Al + 1,5Fe)	0,45	26,2	0,00004
Ohmax	1,65	97	0,0001
Radiohm (78,5 Fe 16,5 Cu + 5,5 Al)	1,5	87,2	0,0007
Therio (85 Cu + 0,5 Mn + 5,5 Al)	0,45	26,2	0,00001
Therio (71 Cu + 16,5 Al + 10,6 Mn + 1,9 Fe)	0,414	24	0,00001

**Tabla 1-6. Principales características de aleaciones de alta resistividad.**

La conductividad de un conglomerado de polvo de carbón depende de varios factores de tipo cualitativo, difícilmente ponderables, a saber:

- Clase del carbón; algunos son muy conductores y otros muy poco conductores.
- Estado de división del polvo.
- Presión sobre los mismos; la presión aumenta la conductividad, y sólo está limitada por la posibilidad de disgregación.
- Estado de la superficie de los cristales.
- Materias extrañas incorporadas al polvo; éstas obran por su propia conductividad.
- Mezcla de carbones distintos.

<sup>4</sup> El diamante es un cristal muy duro, de conductividad casi nula, sin aplicaciones prácticas en electricidad; mientras que el grafito es un cristal que posee alta conductividad eléctrica.



### **1.1.3 Materiales para contactos eléctricos**

La expresión **contacto eléctrico** implica la unión entre conductores. Idealmente esta unión no debe modificar las características del circuito, es decir, no debe introducir capacidad, inductancia o resistencia apreciable. Normalmente la capacidad y la inductancia correspondiente a la unión son despreciables, y el problema, en condiciones estacionarias, se reduce a mantener la resistencia de contacto tan baja como sea posible.-

Las principales características de un material ideal para contactos eléctricos son:

- Elevada conductividad eléctrica.
- Elevada conductividad térmica.
- Elevada resistencia a la corrosión.
- Baja resistencia superficial.
- Alto punto de fusión.
- Resistencia al arco.
- Resistencia a pegarse o soldarse.
- Resistencia mecánica.
- Bajo costo.

No existe un material de contacto universal, ya que no se encuentra uno que reúna todas las características antes mencionadas.-

Los materiales sólidos para contacto pueden ser agrupados en cuatro clases diferentes.-

#### **1.1.3.1 Materiales de alta conductividad**

Pertenecen a este grupo la plata y algunas aleaciones de la misma. La principal ventaja de la plata en este caso, es su elevada conductividad térmica y eléctrica; y sus principales desventajas son su bajo punto de fusión, su dureza relativamente pequeña, su tendencia a picarse y su tendencia a formar una capa superficial sulfurosa y de alta resistencia de contacto. Estos inconvenientes se solucionan, en gran medida, aleándola con otros materiales como: cobre, cadmio, zinc, magnesio, hierro, platino, paladio, etc..-

#### **1.1.3.2 Materiales de alta resistencia a la corrosión**

Pertenecen a este grupo, metales nobles como el oro, el platino y el paladio. Los contactos hechos con estos metales se utilizan solamente en aplicaciones sensibles, especialmente cuando los contactos pueden estar sometidos a la contaminación del ambiente, con la consecuente corrosión o formación de películas superficiales. Se emplean con corrientes reducidas y con presiones entre los contactos muy bajas.-

Aunque algunos de estos metales suelen usarse solos, en general, por ser blandos, se usan aleados con otros elementos como: iridio, osmio, rutenio, rodio y muchas veces también plata, cobre, níquel, hierro, etc..-

#### **1.1.3.3 Materiales duros, refractarios o resistentes al arco**

Pertenecen a este grupo el molibdeno y el tungsteno, materiales que poseen una elevada resistencia al arco (por estas circunstancias se denominan refractarios). Los contactos hechos con estos materiales se emplean para operaciones continuas o muy frecuentes, y para corrientes del orden de 5 a 10 amperes. Su dureza permite presiones mecánicas muy elevadas. Tiene un inconveniente, su tendencia a formar óxidos de alta resistencia eléctrica, pero este inconveniente puede ser superado con presiones de contactos elevadas, con cierres deslizantes o efecto del martilleo, o empleando circuitos de protección auxiliares para reducir o suprimir el arco.-

#### **1.1.3.4 Materiales de alta conductividad y resistentes al arco**

Son aleaciones de tungsteno y molibdeno logradas según la metalurgia de los polvos metálicos. Esta técnica se usa debido a la dificultad de fundir dichos metales, y consiste en moldear, hornear y luego aglomerar a elevada temperatura y en atmósferas especiales los polvos metalúrgicos componentes de la aleación.-

Son ejemplo de este grupo los materiales siguientes: **tungsteno-plata, plata-molibdeno, plata-carburo de tungsteno, plata-carburo de molibdeno, cobre-tungsteno, cobre-carburo de tungsteno**, etc., aleaciones que tienen en su composición también pequeñas cantidades de: níquel, hierro, grafito, etc..-

Pueden distinguirse tres tipos según la composición:

- A) Con un 10% a un 30% de material de alta conductividad (Ag o Cu).
- B) Con cantidades iguales de materiales refractarios y de alta conductividad.
- C) Con un 10% a un 30% de material refractario (tungsteno o molibdeno).

Los primeros se emplean en contactos para regímenes severos de trabajo; los segundos cuando además de las condiciones relativamente severas de trabajo, deben tenerse en cuenta largos períodos de funcionamiento sin un aumento excesivo de temperatura; y los últimos, en contactos para regímenes livianos de trabajo, reemplazando muchas veces a aleaciones de plata.-

#### **1.1.4 Materiales para fusibles eléctricos**

Son materiales (metales o aleaciones metálicas), generalmente de no muy alto punto de fusión, que se emplean en la fabricación de los llamados fusibles eléctricos (alambres y láminas fusibles).-

Entre estos materiales se puede mencionar la plata, el aluminio, la aleación 2Pb-1Sn, etc..-

Al circular corriente por un fusible, la resistencia del mismo provoca una disipación de energía con el correspondiente aumento de temperatura. Habrá entonces un valor de corriente que fundirá el fusible y abrirá el circuito, siempre que se apague el arco.-

En funcionamiento normal, un fusible no debe llegar a una temperatura que ponga en peligro el fusible mismo, o su soporte aislante. Queda así planteado que hay una intensidad de corriente máxima que debe soportar en régimen continuo; esta intensidad se llama intensidad nominal  $I_n$ .-

Existe a su vez, una intensidad de corriente para la cual el fusible se funde, garantizando la protección, y que se llama intensidad de fusión  $I_f$ .-

La  $I_n$  debe ser del orden del 30% al 50% de  $I_f$  para pequeñas intensidades, y del orden del 70% al 80% de  $I_f$  para grandes intensidades.-

La corriente que determina la fusión de alambres largos, tensos, y en ambientes calmos, es del orden de:

$$I = a \sqrt{d^2} [A]$$

Donde  $d$  es el diámetro en milímetros y  $a$  una constante que depende del material.-

Esta fórmula puede dar valores erróneos pues supone que todo el calor se transmite por radiación.-

Además de las consideraciones anteriores. Hay que tener en cuenta la constante de tiempo, es decir, el tiempo transcurrido desde el momento en que la intensidad de corriente del circuito se hace peligrosa y puede fundir el fusible, hasta el instante en que éste se funde efectivamente. Normalmente la constante de tiempo debe ser pequeña, pero hay que tener en cuenta que el fusible debe poder resistir sobrecargas de corta duración, sin fundirse.-

La constante de tiempo varía mucho de un metal a otro y depende en gran medida, de la inercia de éstos para la fusión. Esta inercia queda definida por el tiempo necesario para que se produzca la fusión, teniendo en cuenta que, dos fusibles para la misma corriente límite, pero de metales diferentes, funden en tiempos distintos.-

En el cuadro siguiente se consignan, con fines comparativos, algunas características de diversos materiales.-

<i>Material</i>	<i>Inercia relativa</i>	<i>Punto de Fusión</i>	<i>Masa relativa</i>	<i>Valor de la cte. a</i>
Cobre	1	1054	1	80
Plata	1,66	954	1,47	70
Aluminio	3,04	600	3,08	60
Plomo	6,08	325	20,25	11
Estaño	7	230	13,90	13
Aleación Pb-Sn	3,1	135	14,40	10

**Tabla 1-7. Características de algunos materiales.**

#### **1.1.4.1 Consideraciones sobre la elección de materiales para fusibles**

Cuando se requiere una gran seguridad, se emplea la plata, por su elevada conductividad, su inoxidabilidad y su precisión para la fusión. Este metal es también el mas indicado para corrientes bajas, y es casi indispensables para intensidades menores a 3 amperes.-

La aleación plomo-estaño, es conveniente para corrientes de 5 a 30 amperes. Con intensidades mayores, hay una gran proyección del material durante la fusión, lo que puede resultar peligroso. Para intensidades bajas tampoco conviene esta aleación, ya que el hilo tendría que ser muy fino, y se aplastaría con la presión de los tornillos.-

El aluminio, de poca precisión, presenta un retraso muy grande para la fusión, lo cual puede representar una ventaja en las redes de distribución pública, ya que soporta perfectamente las sobrecargas instantáneas.-

Ni el estaño ni el plomo son utilizables para corrientes intensas por su gran inercia de masa.-

## **1.2 Materiales no conductores**

Los materiales no conductores se utilizan para:

1. Construir estructuras físicas que tengan por objeto evitar corrientes de conducción, denominándose en estos casos **aislantes**.
2. Modificar el valor del campo eléctrico, denominándose en estos casos **dieléctricos**.

### **1.2.1 Definiciones**

#### **1.2.1.1 Aislantes eléctricos**

Es un material de conductividad prácticamente nula o muy baja, que idealmente no permite el paso de la corriente. La pequeña corriente que en la práctica puede circular a través del mismo, se llama **corriente de fuga**.

#### **1.2.1.2 Dieléctricos**

Es, según definición de la A.S.A., un medio que tiene la propiedad de que la energía requerida para establecer en él, un campo eléctrico, es recuperable total o parcialmente como energía eléctrica.-

De lo anterior se deduce que las propiedades aislantes y las propiedades dieléctricas de un medio son distintas. Las propiedades aislantes están vinculadas a las corrientes de conducción, mientras que las propiedades dieléctricas están vinculadas al campo propiamente dicho, y a las corrientes de desplazamiento. Un ejemplo: El aire es uno de los mejores aislantes sin embargo no es de los mejores dieléctricos, y su rigidez dieléctrica no es muy elevada.-

Un medio dieléctrico es un medio en el que puede existir un campo eléctrico (en estado estático). Un medio conductor por el contrario, es un medio en el cual el campo eléctrico (en estado estático) no puede subsistir, es nulo en cualquier punto interior del mismo.-

Los conductores son pues opacos al campo eléctrico, en cambio los dieléctricos son transparentes al mismo, y de allí su nombre.-

Las características principales de los materiales no conductores, que definen su comportamiento eléctrico son:

- Permittividad. (Constante dieléctrica).
- Resistividad interna o volumétrica.
- Resistividad superficial.
- Factor de potencia.
- Factor de disipación.
- Rigidez dieléctrica.

### **1.2.2 Polarización**

Los materiales no conductores están constituidos por átomos con electrones tan fuertemente unidos a los núcleos atómicos que, la aplicación de campos eléctricos, normalmente no provocan migraciones de carga; sin embargo las cargas positivas y negativas (en equilibrio eléctrico) presentes en el material, pueden en presencia de campos eléctricos exteriormente aplicados, desplazarse ligeramente (en escala atómica) rompiéndose el equilibrio eléctrico y haciendo que se presenten dipolos orientados en la dirección del campo eléctrico; dicho desequilibrio desaparece al desaparecer el campo aplicado. Este proceso de aparición de dipolos orientados recibe el nombre de **polarización**, y los materiales en los que se presenta el fenómeno son los llamados dieléctricos. Faraday fue el primero en reconocer este fenómeno como polarización dieléctrica.-

Los dieléctricos pueden clasificarse en no polares, o de primera especie, y polares o de segunda especie, según que las moléculas sean no polares o polares.-

Son moléculas no polares aquellas en las que, en ausencia de campo externo, coinciden los centros de gravedad de las cargas positivas y las cargas negativas.-

Son moléculas polares aquellas en las que, en ausencia de campo externo, no coinciden los centros de gravedad de las cargas positivas y las cargas negativas, constituyendo dipolos (no orientados) aún sin la presencia de campos eléctricos externos.-

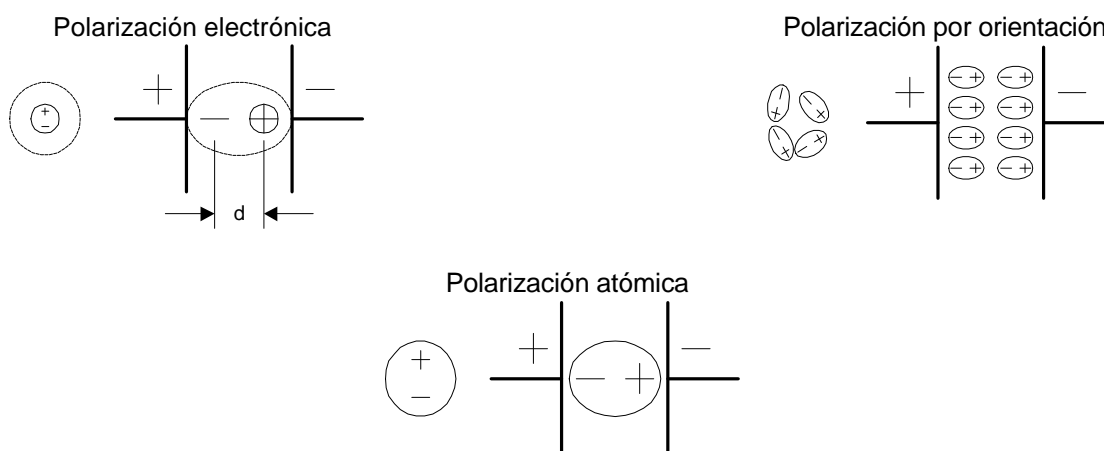
Hay varios mecanismos de polarización de los dieléctricos (Figura 1-4), a saber:

- **Polarización electrónica**, que consiste en un desplazamiento relativo de la nube de electrones con relación al núcleo atómico.
- **Polarización iónica o atómica**, que consiste en un desplazamiento relativo de los átomos que constituyen la molécula.
- **Polarización por orientación**, que consiste en una orientación de las moléculas polares bajo la acción del campo aplicado.
- **Polarización por carga de espacio o interfacial** que es debida a cargas que pueden migrar ciertas distancias dentro del material.

La polarización electrónica y la polarización iónica se engloban bajo el término de polarización por deformación.-

La polarización electrónica tiene lugar en los átomos, iones o moléculas; bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado, se produce un desplazamiento de la nube electrónica de cada átomo, de modo que el centro de gravedad de las cargas negativas se desplaza una distancia  $d$  del núcleo positivo. Este desplazamiento provoca la formación de dipolos (dipolos inducidos), y la polarización del átomo.-

La polarización iónica o atómica se presenta en sustancias iónicas con moléculas polares o no polares, las que, como consecuencia del carácter (iónico o covalente) de la unión, tienen átomos con excesos de cargas positivas o negativas (iones) que se desplazan solicitados por el campo exterior.-



**Figura 1-4. Fenómeno de la polarización.**

La polarización por orientación se produce solamente en las sustancias cuyas moléculas son polares, es decir que contienen dipolos aún sin la presencia de campo eléctrico exterior. Estos dipolos normalmente distribuidos al azar se orientan en presencia de un campo exterior, con la consiguiente polarización de la sustancia.-

La elevación de temperatura, al provocar un aumento del desorden de las moléculas en el espacio, disminuye los efectos de la polarización por orientación, no influenciando a las componentes de polarización por deformación.-

Aparentemente no todos los átomos o moléculas presentan los tres tipos de polarización descritos, pero aparentemente todos manifiestan polarización electrónica.-

Los tres tipos de polarización analizados, la polarización electrónica  $\alpha_e$ , la polarización iónica o atómica  $\alpha_a$  y la polarización por orientación  $\alpha_o$ , están planteados en sustancias no conductoras perfectas. Sin embargo en la

estructura de sólidos y líquidos no conductores, existen portadores de carga que pueden migrar ciertas distancias dentro del dieléctrico. Cuando estos portadores no pueden ser libremente descargados o reemplazados en los electrodos, o quedan atrapados en el material y se acumulan en los límites entre las fases de los dieléctricos multifacéticos, crean cargas de espacio y producen como consecuencia una microscópica distorsión del campo. Esta distorsión aparece exteriormente como un aumento de la polarización, por lo que suele agregarse un cuarto mecanismo de polarización que se la llama por carga de espacio o interfacial caracterizada por la polarizabilidad por carga de espacio  $\alpha_s$ .

Los cuatro mecanismos de polarización mencionados son independientes uno del otro y la polarización total de un material dieléctrico puede escribirse como la suma de los cuatro términos:

$$a = a_c + a_a + a_o + a_s$$

El resultado neto de la polarización, es la producción de una capa de cargas positivas sobre una de las caras y una capa de cargas negativas sobre la otra cara. El fenómeno de la polarización puede visualizarse como una serie de dipolos orientados bajo la influencia del campo aplicado y formando contracargas en sus extremos opuestos.-

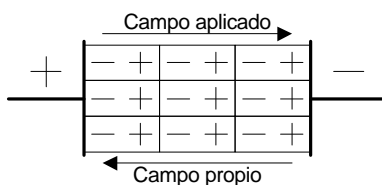


Figura 1-5. Dieléctrico polarizado.

Un dieléctrico polarizado produce un campo propio que modifica el valor del campo que dio origen a la polarización.-

En un capacitor cuando el dieléctrico se polariza, neutraliza las cargas en la superficie de los electrodos y permite que fluya una ulterior cantidad de electricidad aumentando como consecuencia la capacidad de dicho capacitor.-

Ya en 1837 Faraday demostró que si se llena completamente el espacio comprendido entre dos placas de un capacitor con un dieléctrico, la capacidad del capacitor queda multiplicada por un factor **k** mayor que la unidad. Este factor es el llamado **poder inductor específico** o **constante dieléctrica relativa** (al vacío)  $\epsilon_r$  y es independiente de la forma del capacitor, dependiendo exclusivamente del dieléctrico. Al vacío se le asigna el valor  $\epsilon_r=1$ , el aire tiene un  $\epsilon_r=1,00059$  (tan próximo a 1 que normalmente se desprecia su influencia), los distintos tipos de vidrio tienen un  $\epsilon_r=5$  a 10, el agua  $\epsilon_r=81$ , etc..-

Por definición, la constante dieléctrica relativa de un medio, es la relación entre la capacidad de un capacitor con dicho medio como dieléctrico sobre la capacidad de otro con el vacío como dieléctrico:

$$\frac{C}{C_0} = K \cdot \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

donde **C** es la capacidad de un capacitor con un dieléctrico de constante dieléctrica  $\epsilon$  y **C<sub>0</sub>** es la capacidad de un capacitor con el vacío como dieléctrico.-

La llamada constante dieléctrica no es una constante, y su valor se ve influenciado por la temperatura y la frecuencia.-

El fenómeno de la polarización puede analizarse de la siguiente manera: supóngase un dieléctrico homogéneo e isótropo<sup>5</sup>, sometido a la acción de un campo eléctrico homogéneo producido por dos capas paralelas y con cargas eléctricas.-

<sup>5</sup> Dícese del medio cuyas propiedades físicas son iguales en todas las direcciones.

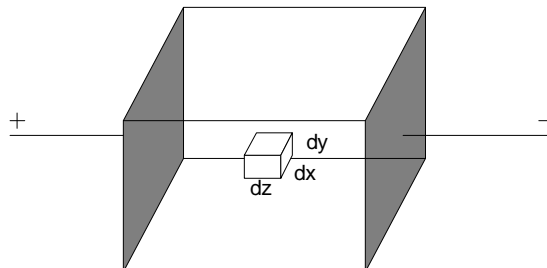
La relación entre la intensidad del campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , y la intensidad del flujo (inducción o desplazamiento)  $\mathbf{D}$  es:

$$\mathbf{D} = \epsilon \cdot \mathbf{E}$$

donde  $\epsilon$  es la llamada permitividad o constante dieléctrica absoluta del medio, y corresponde a la permeabilidad  $\mu$  de los campos magnéticos, pero a diferencia de ésta su valor es independiente de  $\mathbf{E}$  y de  $\mathbf{D}$ :

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

siendo  $\epsilon_0$  la constante dieléctrica absoluta del vacío (en el sistema M.K.S.  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  [F/m]) y  $\epsilon_r$  la constante dieléctrica relativa al medio.-



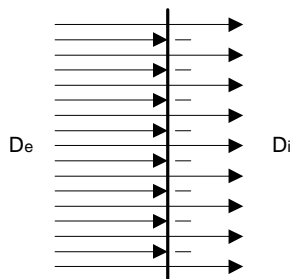
**Figura 1-6. Dieléctrico sumergido en un campo eléctrico homogéneo.**

Si en el dieléctrico en cuestión se extrae hipotéticamente un pequeño elemento de volumen  $\partial \mathbf{x} \cdot \partial \mathbf{y} \cdot \partial \mathbf{z}$  elegido de modo que  $\partial \mathbf{z}$  sea perpendicular a las placas (Figura 1-6), se provoca evidentemente una distorsión del campo, y el mismo deja de ser homogéneo (Figura 1-7), es decir, que si  $\mathbf{E}_i$  y  $\mathbf{E}_e$  representaban el campo dentro y fuera de la cavidad,  $\mathbf{E}_i \neq \mathbf{E}_e$ .-

Si se desea establecer el campo primitivo, es decir, tener  $\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_e = \mathbf{E}$ , se deberá buscar que:

$$\frac{D_i}{\epsilon_0} = \frac{D_0}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} = \frac{D}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} = E$$

o sea, que la densidad de flujo eléctrico sea  $\epsilon_r$  veces mas pequeño dentro de la cavidad. Esto se logra si se dispone de cargas eléctricas en la superficie límite de la cavidad.-



**Figura 1-7. Campo no homogéneo.**

Es decir que para homogeneizar el campo, se deberán colocar una carga positiva  $(\mathbf{D}_e - \mathbf{D}_i) \cdot \partial \mathbf{x} \cdot \partial \mathbf{y}$ , y una carga negativa  $-(\mathbf{D}_e - \mathbf{D}_i) \cdot \partial \mathbf{x} \cdot \partial \mathbf{y}$  sobre las caras derechas e izquierda respectivamente del elemento de volumen. A este sistema de cargas le corresponde un momento  $(\mathbf{D}_e - \mathbf{D}_i) \cdot \partial \mathbf{x} \cdot \partial \mathbf{y} \cdot \partial \mathbf{z}$ , y puede deducirse que, evidentemente, el material extraído aportaba un momento de esta magnitud.-

Recordando que  $\mathbf{D}_e / \mathbf{D}_i = \epsilon_r$  puede escribirse:

$$(\mathbf{D}_e - \mathbf{D}_i) \cdot \partial \mathbf{x} \cdot \partial \mathbf{y} \cdot \partial \mathbf{z} = \mathbf{D}_i (\epsilon_r - 1) \cdot \partial \mathbf{x} \cdot \partial \mathbf{y} \cdot \partial \mathbf{z} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \cdot \mathbf{E} \cdot \partial \mathbf{x} \cdot \partial \mathbf{y} \cdot \partial \mathbf{z}$$

Del análisis realizado se deduce que el material tiene, cuando esta sometido a la acción de un campo  $\mathbf{E}$ , un momento bipolar por unidad de volumen  $\mathbf{P} = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r - 1) \cdot \mathbf{E} = (\epsilon - \epsilon_0) \cdot \mathbf{E}$ .-

$\mathbf{P}$  es la polarización del dieléctrico que se expresa también en carga por unidad de área [Coulomb/m<sup>2</sup>] y se llama **vector polarización** o **momento dipolar por unidad de volumen**.-

El término  $(\epsilon_r - 1) = \chi$  se llama susceptibilidad eléctrica.-

La palabra polarización se utiliza cualitativamente, refiriéndose a los desplazamientos relativos de cargas positivas y negativas, y cuantitativamente como una medida del momento dipolar por unidad de volumen en la sustancia polarizada.-

La expresión del momento dipolar por unidad de volumen puede escribirse:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mathbf{E} - \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{D} - \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}$$

o sea:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \cdot \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

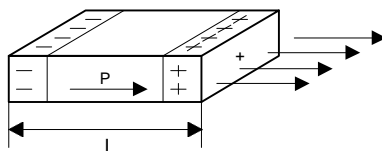
Esta expresión constituye una definición general de  $\mathbf{D}$ , y suministra la relación fundamental entre  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$  y  $\mathbf{P}$ .-

De la expresión anterior se obtiene:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{D}}{\epsilon_0} - \frac{\mathbf{P}}{\epsilon_0}$$

que muestra como se reduce el campo  $\mathbf{E}$  de su valor  $\mathbf{D}/\epsilon_0$  en virtud del campo de polarización inducido en el dieléctrico.-

Existe una relación sencilla entre la polarización  $\mathbf{P}$  y la densidad superficial de carga de polarización  $\sigma_p$  [Coulombio/m<sup>2</sup>]. Esta relación puede obtenerse del siguiente razonamiento: Se supone un bloque de dieléctrico, de superficie lateral  $\mathbf{S}$  y longitud  $\mathbf{l}$ , situado en un campo eléctrico, uniforme y exteriormente aplicado, como muestra la Figura 1-8.-



**Figura 1-8. Bloque dieléctrico inmerso en campo eléctrico.**

El momento dipolar total del bloque será  $\mathbf{P}$  por el volumen del mismo:

$\mathbf{P} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{l}$ .-

Por otra parte, se puede considerar el bloque como un gran dipolo formado por las cargas  $\pm \sigma_p \cdot \mathbf{S}$  separadas por la distancia  $\mathbf{l}$ . En este caso, el momento dipolar del bloque será:  $\sigma_p \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{l}$ .-

Comparando esta expresión con la anterior, se obtiene:

$$\mathbf{P} = |\mathbf{S}_p|$$

que es la relación buscada.-

### 1.2.3 Pérdidas

Los materiales no conductores no son ni aislantes ni dieléctricos perfectos, y por lo tanto presentan pérdidas; entendiéndose como tal, la energía eléctrica por unidad de tiempo transformada en calor, cuando el material está sometido a un campo eléctrico.-

Fundamentalmente las pérdidas pueden clasificarse en:

- Pérdidas por conductividad eléctrica
- Pérdidas dieléctricas

#### 1.2.3.1 Pérdidas por conductividad

Están vinculadas a las corrientes relativamente pequeñas que pueden circular por los materiales llamados no conductores, cuando están sometidos a campos eléctricos (generalmente continuos). El fenómeno de conducción en estos materiales es relativamente complejo (sobre todo en los sólidos), pues a los fenómenos de conducción electrónica (asociados a los electrones de conducción) hay que agregar la conducción iónica, la conducción debido a las



impurezas y muchas veces hay que tener en cuenta la acumulación de cargas que modifican el campo interno.-

Las pérdidas por conductividad son generalmente despreciables en corrientes alternas.-

A continuación se analizarán someramente cada uno de los factores que intervienen en la conducción:

- 1) **Los electrones de conducción:** Están presentes en casi todos los materiales no conductores, y aún los mejores aislantes adquieren bajo la influencia de radiaciones de longitud de onda adecuada, cierta conductividad que sólo puede ser electrónica (Ejemplo: conductividad del cuarzo<sup>6</sup> bajo la influencia de los Rayos X).
- 2) **Los iones:** La conducción iónica puede tener importancia en los líquidos, y también en las sales. En éstas últimas, las moléculas pueden descomponerse en iones, y si bien las sales pueden comportarse como buenos aislantes a temperatura ambiente, esto se debe simplemente a una gran viscosidad que hace que los iones sólo pueden moverse con extrema lentitud. Un aumento de temperatura disminuye la viscosidad aumentando la conductividad. Por ejemplo el vidrio (por su naturaleza química una sal; silicato), al rojo, es tan conductor como un metal.
- 3) **Las impurezas:** Aumentan notablemente la conductividad de los llamados no conductores, un 1% de impurezas puede aumentar en varios cientos de veces, en muchos casos la gran resistividad de un material es un índice de su pureza.
- 4) **Las cargas acumuladas en el dieléctrico:** Modifican el campo interno pudiendo provocar una disminución de la corriente que atraviesa un material.  
La acumulación de cargas provoca el llamado fenómeno de absorción del dieléctrico.-  
La absorción dieléctrica puede definirse como la propiedad de ciertos dieléctricos en los cuales se producen acumulación de cargas eléctricas en el material, cuando el mismo está sujeto a la acción de campos eléctricos y se manifiestan en un capacitor, por ejemplo durante el proceso de carga, por una lenta disminución de la corriente hasta el valor final correspondiente a la corriente de conducción, y en el proceso de descarga por una lenta disminución de la corriente hasta el valor nulo correspondiente a la completa descarga del dieléctrico; es decir que la descarga total de un capacitor no es instantánea.-

### 1.2.3.1.1 Resistividad

Partiendo del hecho de que en los llamados no conductores hay corrientes de conducción, se puede hablar de ciertos valores de conductividad, y consecuentemente, de valores de resistividad. En estos materiales se distinguen dos tipos de resistividad:

- Resistividad interna.
- Resistividad superficial.

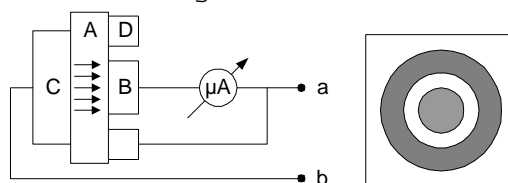
#### 1.2.3.1.1.1 Resistividad interna o volumétrica.

Puede definirse como el valor de la resistencia entre dos cargas opuestas de un volumen unitario de la muestra. Se suele expresar en [ $M\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$ ], o simplemente en [ $M\Omega/\text{cm}$ ].-

Para su determinación se puede recurrir a un dispositivo similar al de la (Figura 1-9): **A** es la probeta del material a ensayar; **B**, **C** y **D** electrodos circulares prensados sobre la probeta. **D** es un electrodo de guardia que evita que el instrumento acuse las corrientes superficiales.-

<sup>6</sup> Véase Materiales piezoeléctricos (pag. 42)

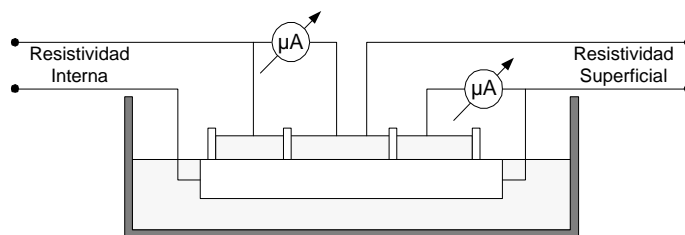
La tensión de ensayo aplicada a los terminales **a** y **b** pueden ser del orden de 500V a 1000V, y la corriente aplicada que circula a través de la muestra se mide con un microamperímetro o un galvanómetro.-



**Figura 1-9. Medición de la resist. volumétrica.**

Los electrodos suelen ser de mercurio, y en ese caso, el montaje presenta las características de la Figura 1-10.-

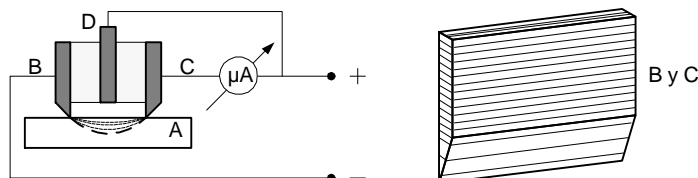
El coeficiente térmico de la resistividad interna o volumétrica es generalmente negativo, lo que pone de manifiesto la naturaleza electrolítica de la conducción.-



**Figura 1-10. Probeta de medición con electrodos de mercurio.**

#### 1.2.3.1.1.2 Resistividad superficial.

Puede definirse como el valor de la resistencia entre los lados opuestos de un elemento unitario de superficie. Para su determinación puede recurrirse al montaje anterior con distinto conexionado o al dispositivo de la Figura 1-11: **A** es el material a ensayar, **B** y **C** dos electrodos en forma de cuchillos y dispuestos paralelamente y **D** es un electrodo de guardia que evita que la corriente que fluye a través del soporte que fija a **B** con **C**, sea acusada por el instrumento.-



**Figura 1-11. Medidor de resistencia superficial.**

El valor medio es lo que se designa como resistencia superficial (resistividad superficial), aunque conceptualmente no sea muy exacto, pues las líneas de fuerza del campo eléctrico se extienden en el interior del cuerpo.-

La resistividad superficial está muy influenciada por la humedad, el polvo depositado o adherido, etc., es decir que a las características propias del dieléctrico, se agregan las características y el estado de la superficie.-

#### 1.2.3.1.2 Resistencia de aislación

Se define como resistencia de aislación, al cociente entre la tensión aplicada, y la corriente circulante entre dos electrodos sumergidos o en contacto con un material.-

La naturaleza de la muestra y la forma de los electrodos puede determinar si el valor de la resistencia de aislación representa principalmente la resistencia interna o la resistencia superficial.-

### 1.2.3.2 Pérdidas dieléctricas

Las pérdidas dieléctricas están vinculadas, en muchos casos, a los fenómenos de polarización, también pueden ser debido a impurezas, pero aún las sustancias rigurosamente puras presentan pérdidas considerables, sobre todo en un determinado rango de frecuencia. Estas pérdidas se deben en gran parte, a una imperfecta elasticidad eléctrica de los dieléctricos, de manera que la tensión aplicada tiene que vencer, además de las fuerzas elásticas, cierta especie de rozamiento molecular o viscosidad (pérdidas por orientación de dipolos). Muchas veces se observa también un retraso de la polarización respecto a la intensidad del campo aplicado con la consecuente pérdida de energía (pérdidas por histéresis dieléctricas). La histéresis dieléctrica esta vinculada al fenómeno de absorción del dieléctrico.-

Las pérdidas dieléctricas no son muy apreciables en corrientes continuas o de baja frecuencia.-

#### 1.2.3.2.1 Circuito equivalente

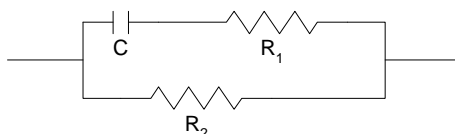


Figura 1-12. Circuito equivalente.

Partiendo del hecho de que los materiales no conductores tienen pérdidas, puede plantearse el circuito de la Figura 1-12 como circuito equivalente de los mismos.-

En este circuito, **C** representa la permitancia del material; **R<sub>1</sub>** representa las pérdidas dieléctricas y **R<sub>2</sub>** las pérdidas por conductividad. En la práctica, estas dos resistencias se combinan en una sola, colocadas en paralelo o en serie con **C**, siempre que se las elija de un valor adecuado.-

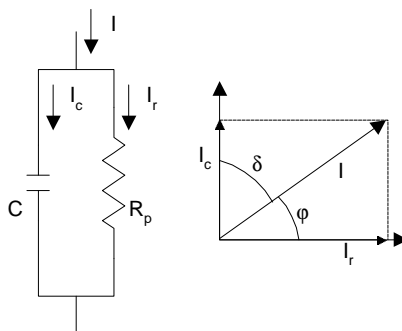


Figura 1-13. Diagrama vectorial.

Los valores de **C**, **R<sub>1</sub>** y **R<sub>2</sub>** son función de la temperatura, de la frecuencia, de la humedad, de la tensión, etc.. En el circuito equivalente paralelo de la Figura 1-13 se puede plantear el siguiente diagrama de vectores de corrientes y tensiones: **φ** es el ángulo de fase (menor de 90°) y **δ** es el ángulo de pérdida (complemento del ángulo de fase) **j + d = 90°**.-

#### 1.2.3.2.2 Factor de potencia

Se denomina factor de potencia al coseno del ángulo de fase (**cos j**), y es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.-

$$\text{Factor de potencia} = \cos j = \sin d = \frac{P_d}{E \cdot I}$$

#### 1.2.3.2.3 Factor de disipación

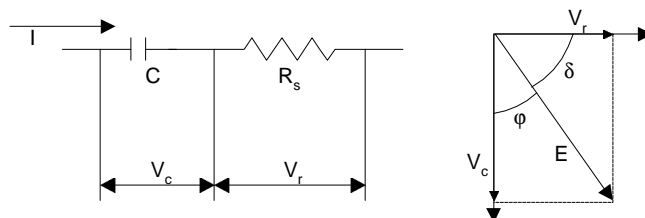
Se denomina factor de disipación **D** a la tangente del ángulo de pérdida (**tg δ**), y es la inversa del factor de mérito **Q**.-

$$D = \tan d = \frac{X_p}{R_p} = \frac{1}{R_p \cdot \omega C} = \frac{1}{Q}$$

En la práctica,  $\delta$  puede ser muy chico, y en ese caso:  
 $\tan d \cong \sin d = \cos j \Rightarrow D = \text{FP}$

y el factor de disipación es sensiblemente igual al factor de potencia.-

El producto  $\epsilon_r \cdot \tan \delta$  se denomina factor de pérdida.-



**Figura 1-14. Circuito equivalente serie. Diagrama vectorial.**

En la Tabla 1-8 se pueden apreciar algunas características de los materiales dieléctricos.-

#### 1.2.3.2.4 Rigidez dieléctrica

Cuando un dieléctrico está sometido a la acción de un campo eléctrico, su estructura sufre ciertas deformaciones, que pueden compararse con las deformaciones de un cuerpo elástico bajo la acción de fuerzas mecánicas. Mientras el campo no llegue a un determinado valor, el dieléctrico puede, desaparecido el campo, recobrar su estado de equilibrio, pero si se sobrepasa este determinado valor, se produce la ruptura del dieléctrico, y la corriente pasa a través del mismo. Este fenómeno se llama descarga disruptiva.-

Se define como **rigidez dieléctrica** de un material, al máximo gradiente de potencial que el mismo puede resistir sin que se produzca la descarga disruptiva. Se expresa generalmente en V/cm, o KV/cm.-

#### 1.2.4 Clasificación de los materiales no conductores

Según las últimas normas del Comité Electrotécnico Internacional los materiales no conductores se clasifican, teniendo en cuenta los valores máximos de temperatura admisible, en:

- **Clase Y:** temperatura máxima de funcionamiento 90°C; algodón, seda y papel y sus derivados, sin impregnación.
- **Clase A:** temperatura máxima 105°C; algodón, seda y papel y sus derivados, convenientemente impregnados, recubiertos o sumergidos en un líquido aislante, por ejemplo, aceite.
- **Clase E:** temperatura máxima 120°C, materiales, simples o compuestos, con estabilidad térmica adecuada para actuar a dicha temperatura.
- **Clase B:** temperatura máxima 130°C; amianto, mica<sup>7</sup>, fibra de vidrio y sus derivados con la adición de aglomerantes apropiados.
- **Clase F:** temperatura máxima 155°C; amianto, mica, fibra de vidrio con los aglomerantes adecuados para soportar dicha temperatura.
- **Clase H:** temperatura máxima 180°C; elastómeros<sup>8</sup> de siliconas<sup>9</sup>, amianto, mica, fibra de vidrio, con resinas de siliconas como aglomerante.
- **Clase C:** temperatura de funcionamiento superior a 180°C; mica, materiales cerámicos, vidrio, cuarzo con aglomerantes inorgánicos o sin ellos.

<sup>7</sup> Véase Mica (pag. 39).

<sup>8</sup> Polímero natural o sintético que presenta propiedades elásticas.

<sup>9</sup> Véase Siliconas (pag. 38)

Material	Constante dieléctrica	Resistividad $K\Omega W$	Rigidez dieléctrica $KV/cm$	Factor de potencia %		Estabilidad hasta $^{\circ}C$	Coeficiente de dilatación lineal $1/10^4 \cdot ^{\circ}C$	Absorción de humedad % en 24 hs	Estab. mecánica
				50Hz	1Mhz				
Baquelita pura	5	$10^3$	100+160	6	1,5	120	28	0,25	Optima
Baquelita estampada	5,5	$10^3$	100+160	3	3,5	140	40	0,3	media
Baquelita + mica	4,7	$10^5$	120+200	1	0,5	150	–	0,1	media
Baquelita + amianto	8	$10^3$	40+130	25	10	200	–	0,3	media
Papel seco	1,7+3,2	–	70+130	0,1	0,2	100	–	25	–
Papel baquelizado	4,5+5	2+500	120+150	–	4	–	–	0,7+2,3	buena
Celulosa acetato	5,3+5,6	$10^4$	100+120	2	4	60+100	150	4	optima
Celulosa acetato butirato	3,5+6,4	$10^3$	80+100	1	1	60+100	–	1+2,2	optima
Celulosa etil	3,2+4	$10^5$	120+200	0,5	1	45+85	–	0,5+1,4	optima
Celulosa nitro	7+7,5	$10^2$	100+220	0	6	60	140	2	optima
Ebonita	2+3	–	300+1100	1	0,5	65	70+80	–	optima
Resinas epoxidica	3,7+4,5	$10^4$	160+200	0,2	2	–	–	0,2	mala
Fibra vulcanizada	4+5	–	20+22	6+9	5	95	25	–	optima
Goma vulcanizada	2,4+3	–	160+500	5	10	–	–	–	–
Goma laca	2,5+4	–	–	2,5	9	75	–	–	–
Resina de melamina	6,7+7,5	$10^3$	100+160	3	3	100	–	0,1	–
Resina metacrilica	2,8+3,4	$10^6$	160	3	2	90	70	0,3	optima
Mica transp (Ruby)	5,4	–	600+2000	0,03	0,02	600	3+7	–	–
Micallex	6+8	–	–	–	0,3	350	8+9	0,035	mala
Micanita	3+3,8	–	300+400	–	–	110	–	–	buena
Aceite de condensadores	2+2,5	$10^7$	115+170	0,001	–	–	–	–	–
Parafina	2+2,5	–	140+150	–	–	50	–	–	–
Polietileno	2,3	$10^{10}$	400	0,01	0,02	130	–	–	–
Poliestireno	2,4+2,9	$10^{10}$	200+300	0,02	0,03	75	70	0,01	buena
PTFE	2	$10^{10}$	400+600	0,01	0,02	250	–	despreciable	–
PTFCE	2,4	$10^9$	160	2	0,8	150	–	despreciable	–
Polivinilo	3+3,3	$10^6$	120+160	1,5	1,7	50	70	0,15	optima
Porcelana A T	6,5+7	–	250	2	0,6	1000	4+5	baja	–
Cuarzo fundido	4,2	–	–	0,03	0,03	1150	0,45	0	–
Goma de siliconas	2,8+3,5	–	130+260	0,6	0,2	–	–	9	–
Esteatita	6,1	–	–	1	0,3	1000	6+8	0,02	–
<b>Estratificados:</b>									
vidrio-fenol	–	10	60+80	–	6	150	–	0,4	–
vidrio-melamina	–	20	60+80	–	8	150	–	0,2	–
vidrio-silicona	–	500	100–120	–	0,2	250	–	0,25	–
Tela baquelizada	5+7	6+300	36+90	25	4,5	–	–	0,9+1,4	buena
Bióxido de titanio	90+170	–	–	–	0,06	–	7+8	0	–
Urea-formaldehido	6+7	$10^4$	100+130	3,5	3	80	–	0,4	buena
Vidrio	5+8	$10^3+10^4$	400+1000	2	0,6	–	7,9	0	–
Vidrio pyrex	4,5	$10^4$	700	0,9	0,3	520	3,2	0	–

Tabla 1-8. Características medias de los materiales dieléctricos.

## 1.2.5 Breve descripción de algunos materiales no conductores

### 1.2.5.1 Caucho

La gran difusión del caucho como aislante eléctrico es debida a la combinación de sus buenas cualidades dieléctricas y mecánicas para usos corrientes, con características peculiares como la flexibilidad, la posibilidad de soportar notables deformaciones sin romperse, adquiriendo otra vez la forma primitiva, la resistencia a la abrasión, etc.. El caucho sintético ofrece también la posibilidad de resistencia a la acción de los aceites, del ozono y de las temperaturas elevadas.-

#### 1.2.5.1.1 Caucho natural

Procedente de algunos árboles se obtiene el **Látex**, constituido por una dispersión coloidal de partículas de caucho. Tratada con ácido acético, esta dispersión se coagula, constituyendo el **Pará** en hojas o grumos.-

Para adquirir sus características bien conocidas, el caucho bruto se vulcaniza, tratamiento químico que consiste en calentarlo con azufre disperso

en su masa a temperaturas comprendidas entre 110°C y 170°C, o tratarlo en frío con cloruro de azufre disuelto en sulfuro de carbono. El tanto por ciento de azufre introducido puede ser muy pequeño, generalmente oscila alrededor del 0,5% al 3%. El azufre añadido no se combina completamente; la parte que permanece libre se traslada lentamente a la superficie de los objetos de caucho bajo la forma de diminutos cristales parduscos.-

A la mezcla se añaden sustancias de relleno, algunas de las cuales, como el negro de humo, confieren características especiales a los productos terminados (resistencia a la abrasión, etc.), mientras la mayor parte son materiales inertes (talco, yeso, caolín<sup>10</sup>). Las mezclas adoptadas para el aislamiento de cables eléctricos contienen una cantidad mínima de relleno, que en otras aplicaciones alcanza hasta el 80%.-

Las propiedades eléctricas de las mezclas resultan intermedias entre las de goma vulcanizada y las de sustancias de relleno.-

La constante dieléctrica tiene un valor próximo a  $\epsilon_r=2,5$ ; el factor de potencia de 4,5%, y la resistividad de masa en torno a  $10^{15}\Omega\cdot\text{dm}$ , refiriéndose a la goma vulcanizada. Los mencionados valores resultan duplicados o triplicados para la constante dieléctrica de una mezcla, mientras el factor de potencia puede llegar a ser 8 o 10 veces mayor. La resistividad no presenta variaciones notables.-

#### 1.2.5.1.2 Caucho sintético

El primer tipo de caucho sintético fue el compuesto estírol-butadieno (**Bunas**) que tiene las características prácticamente iguales a las del caucho natural y se trata de forma análoga para la producción de objetos.-

Otros tipos de caucho sintético adoptados como dieléctricos son el isoprano-butileno (**Butilgoma**), el policloropreno (**Neopreno P.C.P.**) y la goma de silicona (**Silastic**). Todos estos cauchos sintéticos se vulcanizan, los dos primeros con azufre, los otros con óxidos metálicos.-

La constante dieléctrica para todos los tipos de caucho oscila entre los límites ya mencionados para el caucho natural. El factor de potencia de la butilgoma y del caucho de silicona resulta aproximadamente una décima parte del correspondiente al caucho natural.-

El caucho de silicona presenta una elevada hidrorrepulsión superficial, siendo muy resistente al ataque del ozono y pudiéndose trabajar, por consiguiente, en presencia de efluvios<sup>11</sup> (efecto corona). Ininflamable y con cenizas no conductoras es adecuado para el aislamiento de conductores, para el ajustado de condensadores y transformadores y para el encapsulado en frío de dispositivos electrónicos.-

#### 1.2.5.2 Ebonita

Aumentando el tanto por ciento de azufre introducido en la mezcla de caucho, se obtienen una serie de gomas con dureza cada vez creciente; es decir, distintas clases de ebonitas. Es necesario, sin embargo, un mayor tiempo de vulcanización, o sea, calentamiento de la masa, el cual debe controlarse cuidadosamente, pues de otra forma se producirían sopladuras<sup>12</sup>. La ebonita contiene por término medio un 32% de azufre.-

Este dieléctrico posee buenas cualidades eléctricas y mecánicas y era muy adecuado para el estampado de soportes mecánicos aislantes, de planchas, y dada su elevada resistencia a los óxidos, como recipiente de acumuladores transportables. Para el estampado se emplea también polvo de ebonita que es tratado a temperaturas elevadas, tal como las resinas sintéticas.-

Para obtener las mejores características eléctricas se introducen sustancias de relleno, como el cuarzo o la mica, finamente pulverizados.-

<sup>10</sup> Roca arcillosa, blanca y desmenuzable, compuesta esencialmente por un silicato natural llamado caolinita.

<sup>11</sup> Emisión o exhalación de pequeñas partículas o vapores de un cuerpo.

<sup>12</sup> Cada una de las cavidades llenas de gases ocluidos durante la solidificación de una masa de metal fundido.

### 1.2.5.3 Papel

El papel es uno de los materiales mas usados como aislante o dieléctrico, su importancia se deriva de sus notables cualidades intrínsecas y su bajo precio, su principal desventaja reside en que generalmente, debe ser impregnado.-

En cables, las ventajas que ofrece son: temperatura de trabajo relativamente elevada (hasta los 70°C) la que es apreciablemente mas elevada que para la goma; las bajas pérdidas dieléctricas y la alta rigidez dieléctrica.-

Se pueden utilizar:

- A) **Simplemente secados:** están aislados así los cables bajo plomo empleados en las líneas telefónicas.-
- B) **Impregnados:** con aceite mineral, o con aceite mineral y colofonia<sup>13</sup>, y protegido con vaina de plomo, generalmente usados para la distribución de energía eléctrica en mediana y baja tensión.

Es usado en capacitores (para este uso el papel es secado y tratado con parafina o cera, o bien se impregna al vacío con aceites minerales o sintéticos).-

También es usado en forma de estratificados<sup>14</sup> (en planchas o tubos) fabricados mediante resinas sintéticas o goma laca.-

El papel está constituido por fibra de celulosa  $(C_6H_{10}O_3)_n$  elemento esencial de la estructura de la celulosa vegetal.-

En estado puro se presenta como una masa blanca, amorfa (el papel de fibra de lino, sometido a un proceso de blanqueado y no encolado, puede considerarse prácticamente como celulosa pura).-

El papel mas fino es usado para elaborar capacitores, se lo hace tan fino como es posible, siempre compatible con las buenas propiedades de aislación eléctrica. Es usual aplicar varias capas de papel y raramente una sola, para que la presencia de pequeñas partículas conductoras no tengan mucha importancia. El papel de capacitores se elabora con espesores desde 7,5µm a 10µm.-

A los efectos de que no queden espacios vacíos en las estructuras del papel para capacitor éste se elabora con fibras cortas las que a su vez aseguran gran impermeabilidad. Por su parte la resistencia a la tracción es baja pero suficiente para soportar las tareas requeridas, o sea el arrollado sobre formas cilíndricas a alta velocidad.-

El papel para cables es resistente y se usa en la aislación de cables de alta y media tensión, de transformadores, bobinas, etc..-

#### 1.2.5.3.1 Papel no impregnado

Las propiedades eléctricas del papel no impregnado no son muy importantes. El papel no impregnado tiene una baja rigidez dieléctrica, solamente unas pocas veces mayor que la de una película de aire del mismo espesor. Esto es comprensible dado que en un papel de gran densidad (1,1 a 1,2gr/cm<sup>3</sup>) por lo menos el 20% del volumen del papel es ocupado por canales de aire, y con un papel de densidad media (0,7gr/cm<sup>3</sup>) el porcentaje de aire es de alrededor del 50%. Esta rigidez se puede estimar entre 6 y 11kV/mm (valor eficaz).-

La constante dieléctrica relativa de la celulosa pura es de alrededor de  $\epsilon_r=6,5$  y de la fibra de papel aproximadamente  $\epsilon_r=5,5$ . La constante dieléctrica de un papel aumenta con el aumento del contenido de humedad, aumenta ligeramente con la temperatura y disminuye ligeramente con la frecuencia. Tiene una gran dependencia con la densidad, para densidades entre 0,6 a 1,12gr/cm<sup>3</sup> la constante dieléctrica varía de  $\epsilon_r=1,7$  a  $\epsilon_r=3,2$ .-

Hay gran divergencia entre los valores señalados por los distintos fabricantes, debido no solamente por el uso de diferentes técnicas de medida, sino también por diferencias en frecuencia, temperatura y principalmente

<sup>13</sup> Véase Resinas naturales (pag. 31).

<sup>14</sup> Dispuestos en capas superpuestas o estratos.

contenido de humedad, la cual en el caso del papel es extremadamente difícil de definir y medir.-

#### 1.2.5.3.2 Papel impregnado

No es posible dar detalles completo de las características dieléctricas del papel impregnado sin especificar completamente el tipo de impregnante, construcción de aislante, etc..-

Con un buen impregnante se obtienen muy altas resistividades (en corriente continua). En el caso del papel parafinado es  $10^{10} \text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ , y en el caso de papel impregnado para cables se tienen valores de  $3 \cdot 10^2$  a  $5 \cdot 10^3 \text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ . Aunque esto disminuye 1000 veces a  $100^\circ\text{C}$  de temperatura y hay una pequeña disminución al aumentar el gradiente de potencia.-

La rigidez dieléctrica del papel de uso eléctrico impregnado en sus formas comerciales es influenciado por factores tales como presión de electrodos, tipos de electrodos, presencia de cavidades gaseosas, etc.. En los buenos papeles para cables se obtienen generalmente valores de rigidez de  $200 \text{KV/mm}$ .-

La constante dieléctrica varía según la sustancia utilizada en la impregnación, valores normales son  $\epsilon_r=2,5$  a  $\epsilon_r=3,5$ .-

#### 1.2.5.3.3 Algunos de los principales tipos de papeles aislantes

- **Papel Kraft:** Obtenido de pasta química de madera, en espesores desde 0,05 a 0,15mm. Cuando es muy satinado se denomina **Express**. Se emplea como aislante en capas y para la fabricación de laminados fenólicos<sup>15</sup>.
- **Papel para capacitores:** (papel **Tisú**). Se obtiene de pulpas de madera y fibras de algodón, en espesores de hasta 0,013mm. Su pureza debe ser máxima.
- **Papel Manila:** Hecho con fibra de cáñamo en espesores de 0,05 a 0,1mm. Se denominan papel 100%Manila. También existen papeles con 60%Manila-40%Kraft o 50%Manila-50%Kraft.
- **Cartón Pressspan:** Se obtiene de pasta química de madera. Es un material muy denso y su rigidez dieléctrica es de  $6 \text{KV/mm}$ . Barnizado se logra  $8 \text{KV/mm}$ . Se tiene en espesores de hasta 1,5 o 2mm.
- **Cartón Presboard:** De pasta de madera y fibra de algodón; su rigidez varía de acuerdo a los espesores, normalmente es del orden de  $11 \text{KV/mm}$ . Se tiene en espesores de 0,2 a 12mm. Apto para impregnación en aceite.
- **Papel japonés:** Hecho con pulpa de la morera, es un papel finísimo y se emplea principalmente como soporte en la fabricación del papel micro-papel.

#### 1.2.5.4 Fibras textiles

Con esta denominación se conocen los productos fibrosos de diversos orígenes que pueden transformarse en hilos y telas; estos productos se distinguen por algunas de las propiedades de las fibras que los componen, tales como: la longitud, la fineza, la resistencia mecánica, la flexibilidad, etc..-

Pueden ser de diversos orígenes:

- **Vegetal.** De algodón: de la semilla o fruto de la planta; de lino, cáñamo, yute: del tallo o corteza de la planta.
- **Animal.** De seda: producto de secreción del gusano del mismo nombre.
- **Mineral.** De amianto.
- **Artificial.** De vidrio y de productos de materiales plásticos.

Al comienzo de su empleo, solamente se disponía de las fibras naturales y las mas empleadas para usos eléctricos fueron las sedas cuando se requería un buen aislante y el algodón cuando se necesitaba un recubrimiento de costo reducido. Pero con el desarrollo de las fibras artificiales, el rango de disponibilidad de estos materiales se fue incrementando enormemente.-

<sup>15</sup> Véase Resinas fenólicas (pag. 32)



Todos los materiales fibrosos son higroscópicos<sup>16</sup>, ya sean de origen vegetal, animal o mineral, según las condiciones ambientales de humedad y temperatura, contienen siempre un cierto porcentaje de humedad.-

La resistencia a la tracción de las fibras textiles y de los productos manufacturados con ellas, además de la naturaleza del material depende de los procesos de fabricación, humedad y temperatura.-

Resultan también importantes: en los hilos, la regularidad y el grado de torsión; en las telas, la resistencia al desgaste, el número de hilos por unidad de longitud, el poder absorbente, la porosidad, etc.. El título de un hilado representa la relación de su longitud-peso en general, y para la seda y el rayón la inversa, es decir la relación peso-longitud.-

Las telas de algodón, barnizadas o impregnadas, tienen espesores de 0,125 a 0,3mm, con rigidez dieléctrica de 16 a 40KV/mm, según el tipo de tela y de barniz, el espesor, el tiempo de solcitación, etc..-

La seda barnizada o impregnada posee además de una elevada rigidez, una extrema flexibilidad y es usada donde sea necesario un pequeño espesor de aislante. Se la emplea en espesores de 0,08 a 0,15mm y la rigidez puede llegar a los 50KV/mm.-

Las cintas o tiras se cortan de la tela en sentido directo, o en diagonal con respecto a la trama del tejido. Se requieren cintas con trama diagonal cuando se desea encintar con gran regularidad y adherencia, superficies complicadas.-

Son también muy difundidas las cintas de algodón engomadas, de gran adherencia (cintas aisladoras). Las normas IRAM 2030 P especifican sus principales condiciones o características.-

Para pequeños espesores se recurre a la cinta de seda (aproximadamente 0,1mm y un ancho de 10-15 o 20mm).-

#### **1.2.5.5 Resinas**

Pueden ser naturales, artificiales o sintéticas.-

##### **1.2.5.5.1 Resinas naturales**

Son productos minerales de origen fósil o resultantes de la exudación de diferentes vegetales; se utilizan en la fabricación de barnices aislantes. Entre las resinas naturales pueden mencionarse la goma laca, la colofonia, el copol, etc.-

- **Goma laca:** Es un producto de la secreción de las larvas del "*lococcus laca*", animal típico de la India que en número elevado se adhieren a las ramas de ciertos árboles nutriendose con la savia de los mismos.- El porcentaje de resina propiamente dicha en la goma laca es del orden del 65% al 80%, el resto es cera, colorante, ácidos grasos, residuos vegetales y animales, etc.- La goma laca es frágil, tiene un punto de fusión relativamente bajo y es soluble en alcohol.
- **La colofonia:** Es una resina amarilla, sólida, transparente, residuo de la destilación de la savia de ciertas plantas (llamada trementina) del género del pino (chipre, abeto, alerce, etc.). No soluble en agua, pero sí en alcohol o éter; se emplea en la fabricación de barnices o desoxidantes para soldaduras.

##### **1.2.5.5.2 Resinas artificiales**

Son derivados de la celulosa, que es un polímero natural base de las fibras de los vegetales; el algodón es una forma pura de celulosa natural.-

De la celulosa se obtiene, mediante tratamientos químicos, éteres y ésteres que por sus características constituyen materias plásticas.-

- **La Nitrocelulosa:** es el éter de celulosa mas empleado, de la misma se obtiene el celuloide, producto que se reblandece a los 80°C y puede ser moldeado; tiene el inconveniente de ser inflamable.

<sup>16</sup> Que tienden a absorber la humedad del ambiente.-

Agregando a la nitrocelulosa plastificantes y solventes especiales se obtienen soluciones de viscosidad inferior a la del celuloide que se usan en la fabricación de barnices a la nitrocelulosa.

- **El acetato de celulosa:** Es un éster de celulosa que se obtiene tratando a la misma con una mezcla de ácido acético y ácido sulfúrico; es un material termoplástico, ininflamable, que sustituye ventajosamente al celuloide; es transparente, se reblandece a los 180°C y absorbe fácilmente la humedad.
- **La etilcelulosa:** Es un éster de celulosa que se obtiene tratando a la misma con una solución de soda cáustica y a continuación con cloruro de etilo; es mucho mas resistente a los golpes que el acetato de celulosa, no es inflamable, absorbe pequeñas cantidades de humedad y se moldea por inyección calentándolo a 250°C.

### 1.2.5.5.3 Resinas sintéticas

Las resinas sintéticas pueden definirse como sustancias sólidas o semisólidas, obtenidas por reacción química de materias primas resinosas y no resinosas y que poseen aspectos y propiedades físicas análogas a las resinas naturales, aunque tengan diferente composición química y también diferente comportamiento respecto a los distintos reactivos.-

Existen dos tipos: resinas termofraguantes o termoendurecibles y resinas plásticas.-

#### 1.2.5.5.3.1 Resinas termofraguantes o termoendurecibles

Bajo la acción combinada del calor y la presión estas resinas polimerizan<sup>17</sup> alcanzando un estado irreversible en el que el material se ha endurecido, resultando insoluble e infusible. Durante el estampado se obtiene primero el fenómeno físico de la fusión y luego el químico de la polarización con el consiguiente endurecimiento de la pieza.-

##### 1.2.5.5.3.1.1 Resinas fenólicas

Son las llamadas resinas fenol-formaldehído, comúnmente denominadas **baquelita**, nombre derivado del Dr. *Leo. H. Backeland* que las desarrolló en los años 1908-1912; se obtienen haciendo reaccionar el fenol sobre el formaldehído en presencia de un catalizador ácido o básico.-

Diversos tipo de baquelita son,

- **Baquelita A:**  
Es el producto inicial de la condensación, es fusible a 55-60°C; es soluble en solventes comunes: alcohol etílico, glicerina, bencina, acetona, toluol, etc.; tiene el aspecto de masa amorfa, resinosa y fracturas vítreas de color amarillento más o menos claro.
- **Baquelita B:**  
Es un producto intermedio frágil en estado seco, elástico en caliente y parcialmente soluble, capaz de ablandarse con el calor y pasar al estado plástico. Prolongando el calentamiento se pasa a la baquelita C.
- **Baquelita C:**  
Es infusible, insoluble en los solventes ordinarios; inalterable a la acción del agua, del aceite, de los gases, de la irradiación solar y tiene apreciable propiedades mecánicas y eléctricas.
- **Materiales aislantes de papel baquelizado:**  
Se preparan mediante hojas de papel Kraft absorbente 0,06-0,13m/n de elevadas propiedades dieléctricas unidas entre sí mediante la resina. Tienen óptima calidad aislante y buenas características mecánicas también a la temperatura de funcionamiento de las máquinas eléctricas. Tienen buena resistencia a los agentes químicos y se trabajan mediante los procesos comunes en máquinas herramientas. Presentan el

<sup>17</sup> Reacción que, a partir de moléculas de escasa masa molecular, forma, por enlace de éstas, compuestos de masa molecular elevada.

inconveniente de carbonizarse fácilmente cuando se expone a la acción de arco eléctrico.

▪ *Proceso inicial de la fabricación (formación de la resina-impregnación)*

Durante la operación de impregnación la hoja debe cuidarse que la película de barniz que cubre la misma sea lo más homogénea posible y sobre todo que el espesor sea uniforme.-

La temperatura del aire debe controlarse para evitar que por excesivo calor la baquelita pase al estado C. Sólo debe conseguirse que se evapore el solvente. Se cortan del tamaño deseado, una serie de hojas ya baquelizadas de papel (estado A); las hojas en el número requerido para obtener el espesor deseado se colocan sobre una placa de bronce o acero pulido y otra placa igual es colocada arriba. Todo el conjunto se coloca entre dos planos calientes de una prensa hidráulica e inicialmente se trabaja a 20Kg/cm<sup>2</sup> y a 80°C o 90°C. En estas condiciones la resina se funde y se pegan entre sí las hojas.-

Aumentando la presión y temperatura, 100Kg/cm<sup>2</sup> - 170°C, se transforma la resina al estado C.-

La fabricación de tubos se efectúa arrollando el papel baquelizado, sobre un tubo a 180°C-200°C luego horneado sobre el mismo mandril.-

▪ *Propiedades de los laminados en base papel*

- ✓ Peso específico: 1,2gr/cm<sup>3</sup> a 1,4gr/cm<sup>3</sup>
- ✓ Higroscopicidad: depende de la resina que contiene y de su difusión en el papel, cuando se emplean en ambientes húmedos deben barnizarse superficialmente.-
- ✓ Resistencia a la tracción:
 

Placas	➔	600 - 900kg/cm <sup>2</sup>
Tubos	➔	500 - 600kg/cm <sup>2</sup>
- ✓ Rigidez dieléctrica:
 

Espesor 1 - 3mm	➔	22 - 15KV/mm
Espesor 5mm	➔	10KV/mm
- ✓ Temperatura máxima de funcionamiento: 130°C.

▪ *Aplicaciones de los laminados base papel*

- ✓ Placas:(En aire o en aceite)
 

Porta bornes - Soporte contactos - Móviles para interruptores -  
Tableros - Piezas de radio y telefonía - Estructuras aislantes -  
Con el agregado de un papel impreso en su superficie, cumple funciones decorativas.
- ✓ Tubos:
 

Aislación de bornes y pernos en aparatos eléctricos diversos -  
Fabricación de aisladores, e inductores.

• **Otros laminados fenólicos**

Pueden elaborarse en forma similar al método empleado para la obtención de los laminados fenólicos de base papel.

Los más comunes son los que se obtienen en base a telas de algodón, amianto y vidrio.

▪ *Base tela de algodón*

Se emplean como reemplazante de los laminados base papel en la elaboración de piezas aislantes que necesitan muy buenas propiedades mecánicas a la par de un buen comportamiento eléctrico. Se tienen laminados de trama gruesa y fina, según lo sea el género base.

Se emplean en la fabricación de arandelas, tornillos y tuercas aislantes, tableros, etc. En general piezas que deben ser fresadas, torneadas y/o roscadas.

La rigidez dieléctricas es

- ✓ Para espesores de 1 - 3mm ➔ 5 - 7KV/mm
- ✓ Para espesores de 3 - 5mm ➔ 4 - 5KV/mm
- ✓ Para espesores de 5 - 7mm ➔ 3 - 4KV/mm

Para aplicaciones exclusivamente mecánicas se emplea en la fabricación de engranajes silenciosos, cojinetes, etc.

- *Base tela amianto*  
Se emplea donde hay compromisos desde el punto de vista térmico y eléctrico. Posee una temperatura de funcionamiento permanente de 150°C.
  - ✓ Peso específico → 1,6gr/cm<sup>3</sup>
  - ✓ Resistencia a la tracción → 550K/cm<sup>2</sup>
  - ✓ Tensión de ensayo sin perforar en volts
- **Denominación comercial de los laminados fenólico**
  - *Base papel:*  
Celonite - Pertinax - Electroplast - Celisol - Micarta (base papel) - Triemme - Fórmica - etc.-
  - *Base tela algodón:*  
Celotex - Fibroido - Celerón - Textolite - Micarta.-

#### 1.2.5.5.3.1.2 Aminoresinas

A las aminoresinas o aminoplásticos pertenecen las resinas de condensación de la urea con el formaldehído y de la melamina con el formaldehído, también termoendurecidas.-

Ambas poseen, respecto a las resinas fenólicas, una mayor resistencia al arco eléctrico.-

- **Resinas epoxídicas**  
Son resinas de condensación (etoxilínicas que se hallan en el comercio en forma líquida o pastosa). Agregando a la resina un endurecedor adecuado (una amina<sup>18</sup> polivalente) se obtiene una masa dura, transparente, sin la aplicación de presión ni la producción de sustancias volátiles como en las otras resinas termoendurecidas. Una vez añadido el endurecedor, la mezcla puede ser empleada durante cierto tiempo, algunas horas, antes de que se endurezca. La mezcla se funde en un molde adecuado, tanto para obtener piezas estampadas como para encapsular circuitos eléctricos; para que no se adhiera la resina condensada al molde, se unta la superficie interna de éste con cera de silicona. Las resinas epoxídicas poseen, en efecto, una elevada adherencia con los metales, el vidrio y los materiales cerámicos. Aumentando la temperatura en el molde se reduce el tiempo necesario para la condensación, que varía según el tipo de endurecedor empleado. En algunos casos se añaden a la resina distintos rellenos como mica, sílice o talco pulverizado. Nombres comerciales de las resinas epoxídicas son: **Araldit** y **Epicot**, **Poxipol**.

#### 1.2.5.5.3.2 Resinas termoplásticas

Bajo la acción de la presión y la temperatura asumen la forma deseada, pero no alcanzan un estado de endurecimiento irreversible. Durante el estampado se obtiene solo el fenómeno físico de la fusión, por lo tanto para endurecer el material estampado y retirar el mismo de la estampa debe ser completamente enfriado. Estas resinas no manifiestan ningún fenómeno químico.-

Algunas son:

- **Polietileno**  
El polietileno o politeno se obtiene por la polimerización del gas etileno a la temperatura de 200°C y muy elevada presión. Es un material flexible, algo elástico, semiopalino, empleado especialmente en la construcción de cables para RF y líneas bifilares. A 115°C el material pasa a ser completamente pastoso; si se enfría rápidamente, resulta mucho mas flexible. Es muy resistente a las deformaciones y a las grietas hasta los 70°C. A temperaturas mas elevadas se tiene una oxidación del material y un aumento en el valor del factor de potencia. Los rayos ultravioletas favorecen la oxidación a la temperatura ambiente con el consiguiente

<sup>18</sup> Compuesto derivado del amoníaco.

agrietado del material. Para proteger a los cables expuestos a la intemperie se agregan al material pequeñas cantidades de antioxidantes o bien se recubren los cables con una capa de dieléctrico mas resistente.

Nombres comerciales de esta resina son también **Alkatene**, **Hostalén**, y **Marlex**.

- **Poliestireno**

Es una resina dura, amorfa, transparente, que a 100°C se transforma en blanda y elástica como el caucho. Sus excelentes cualidades eléctricas son debidas a no tener una estructura molecular polar.

Es soluble en benceno, constituyendo un barniz adecuado para las bobinas de RF. A veces se le agrega un relleno como polvo de mica o de sílice, que hace aumentar el valor de la constante dieléctrica y la temperatura de reblandecimiento; generalmente las piezas moldeadas tienen una transparencia similar al vidrio.-

Nombres comerciales son también: **Stiroflex** y **Trolitul**.-

- **Polivinilo**

Esta resina, obtenida por polimerización de polivinilo<sup>19</sup>, tiene un aspecto y consistencia similar al cuero. Es soluble en bencina; la máxima temperatura a la que puede someterse sin deformarse es de 60°C. Sus características eléctricas son netamente inferiores a las de las dos clases descriptas anteriormente, debido a que sus moléculas son polares. Estas resinas se indican mediante la sigla **P.V.C.**.-

- **Resinas acrílicas**

Hay otros tipos de resinas derivadas del vinilo, con características muy útiles para aplicaciones especiales. Son las resinas acrílicas (metacrilato de polimetilo), producto perfectamente transparente, con aspecto de vidrio. Esta resina se encuentra en el comercio bajo la forma de planchas o barras que pueden ser moldeadas a la temperatura de 170°C; presentan buenas características eléctricas, una notable resistencia al arco eléctrico y no se agrietan con el tiempo.

Nombres comerciales de estas resinas son: **Perspex**, **Plexiglas**, **Lusite** y **Diacon**.

- **Politetrafluoretileno**

Resina sintética blanca, que experimente a 327°C una notable variación de densidad. Mantiene inalterables sus características para todas las temperaturas del intervalo entre -100°C y 250°C. No es soluble en los disolventes y es difícil de trabajar por estampado o extrusión.

Posee características eléctricas óptimas dada su naturaleza no polar, que resultan fácilmente alteradas si las piezas moldeadas son porosas (tienen lugar ionizaciones en las cavidades, que limitan la máxima tensión aplicable, y la absorción superficial de humedad hace aumentar el factor de potencia).

Nombres comerciales son: **P.T.F.E.** (sigla correspondiente a su nombre), **Teflón**, **Fluón**.

- **Tereftalato de Polietileno**

Resina obtenida por la condensación del glicoletileno y del ácido tereftálico; funde a unos 250°C y conserva sus características mecánicas desde -20°C a 80°C.

Se emplea especialmente bajo la forma de película de algunas micras de espesor, que resulta mucho mas resistente mecánicamente que cualquier otro tipo de película de igual espesor.

Puede trabajar hasta 150°C y es resistente a muchos disolvente y a los aceites (hidrocarburos y clorodifenilos).

Las moléculas de esta resina tienen una estructura polar y sus características eléctricas varían notablemente con la temperatura y la frecuencia. A frecuencias bajas su constante dieléctrica es comparable a la del papel, a frecuencias altas se aproxima a la del poliestireno. Nombres comerciales de esta resina son: **Terylene**, **Mylar**, **Melinex** y **Montivel**.

<sup>19</sup> Polímero obtenido a partir del cloruro y del acetato de vinilo.

### 1.2.5.6 Ceras

#### 1.2.5.6.1 Ceras minerales

- **Parafina**

Se obtiene de la destilación fraccionada de algunos petróleos. Tiene un punto de fusión de 44°C a 88°C la más blanca funde a mayor temperatura. Es inodora, translúcida y en estado puro, no es untuosa; es soluble en bencina, esencia de trementina y sulfuro de carbono.- Tiene una constante dieléctrica de  $\epsilon_r=2$  a 2,5; una resistividad de masa del orden de  $3 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ ; una resistividad superficial de  $10^{12} \Omega$  y una rigidez dieléctrica de aproximadamente 400KV/cm.

Es empleada para la impregnación del papel de condensadores o para los arrollamientos de transformadores.

- **Ozoquerita (ceresina)**

Esta cera se encuentra en yacimientos petrolíferos o de carbón fósil. Es de color amarillo o marrón y tiene un punto de fusión de 60°C a 90°C; se emplea para la impregnación de los arrollamientos de transformadores de alimentación.

Su resistividad de masa es del orden de  $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ , la rigidez dieléctrica de 5KV/cm. Tratada con ácido sulfúrico, y decolorada con negro animal se obtiene la ceresina, blanca, particularmente antihigroscópica, cuya constante dieléctrica es de  $\epsilon_r=2,4$ .

#### 1.2.5.6.2 Ceras sintéticas

- **Cloronaftalinas**

Se obtiene haciendo burbujear cloro seco en naftalina pura fundida variando el tiempo de tratamiento se obtiene diferentes productos en bruto.

El producto bruto se destila obteniéndose aceites sintéticos poco clorados, después destilan los productos sintéticos más puros luego los amorfos y queda al final una sustancia pezosa.

Es necesario controlar la constancia de las características de los productos obtenidos, especialmente las eléctricas.

La constante dieléctrica de las ceras es de aproximadamente  $\epsilon_r=6$ ; el factor de potencia de 0,4%, la resistividad de masa de  $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$  y la rigidez dieléctrica de 150KV/cm. La temperatura de fusión va de 84°C a 138°C, aumentado en los tipos más clorados. Estas ceras son especialmente adecuadas para la impregnación de los condensadores, resultando ininflamables.

No atacan a los metales, son antihigroscópicas, solubles en benzol, bencina, tetracloruro de carbono y acetona.

Impregnando con estas ceras los conductores aislados mediante fibras textiles, se impide la formación de mohos y el ataque de insectos.

Tipo comerciales de estas ceras son la **Halowax americana**, la **Nibren alemana**, la **Aroclor inglesa** y la **Cerital italiana**.

- **Ceras glicol**

Se obtienen del glicoletileno, un tipo comercial como la Glycera Wax es un estearato de glicol.

Son de color blanco o amarillento; funden de 60°C a 80°C; son miscibles<sup>20</sup> (fundiéndolas) con ceras, aceites, resinas y betún.

Tipos comerciales son la **Glyco Wax**, la **Glycera Wax**, el **Gliceril estearato**.

### 1.2.5.7 Aceites

#### 1.2.5.7.1 Aceites minerales

Cuerpos grasos insaponificables<sup>21</sup> derivados del petróleo.-

<sup>20</sup> Que puede formar una mezcla homogénea con otros cuerpos.

<sup>21</sup> Indescomponibles por los ácidos.

Los aceites para ser empleados como aislantes deben ser depurados de las sustancias que hacen disminuir su resistencia de aislamiento y rigidez dieléctrica y aumentar el factor de potencia, sustancias que, por otra parte son químicamente alterables y corrosivas.-

La constante dieléctrica de los aceites aislantes tiene un valor medio de 2,3; su resistividad de masa es de  $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ , la rigidez dieléctrica de 500KV/cm, y el factor de potencia de 0,001 a 0,005%.-

#### **1.2.5.7.2 Aceites sintéticos**

A este grupo de aceites aislantes pertenecen algunos hidrocarburos clorados, como los clorodifenilos y los clorobencenos, que han sido estudiados para sustituir los aceites minerales como dieléctricos en los condensadores de papel y en los transformadores.-

Tiene una constante dieléctrica de 4 a 6, doble que la de los aceites minerales, y una rigidez dieléctrica parecida a la de éstos.-

A su notable estabilidad térmica y química se añade su difícil inflamabilidad y la ventaja de ser más estables contra la oxidación y la de no dar lugar bajo la acción del arco a productos inflamables o explosivos (Askarel).-

Dado su precio elevado se prefieren a los aceites minerales cuando deben emplearse en transformadores que forman parte de equipos electrónicos, que no deben correr riesgo de incendio o bien en los condensadores, por su elevada constante dieléctrica. En este caso, las reducidas dimensiones del condensador y la pequeña cantidad de material requerido, compensan el superior costo.-

#### **1.2.5.7.3 Aceites vegetales**

Contrariamente a los aceites minerales, los aceites vegetales tienen la propiedad de secarse por reacción con el oxígeno, el secado es una reacción química.-

El mecanismo de la solidificación de los aceites secantes es químicamente complejo: consta de una oxidación y de una polimerización, que tiene lugar simultáneamente.-

Estos aceites están constituidos por distintos ácidos orgánicos; los glicéridos, derivados de algunos de estos ácidos (como el linoleico, de aceite de linaza<sup>22</sup>, y el oleostearico, del aceite de madera chino), poseen pronunciadas propiedades secantes.-

La película obtenida por el secado de una capa de aceite está constituida por una sustancia elástica y gomosa que se endurece con el tiempo, llamada linocina en el caso del aceite de linaza. El aceite de linaza debe ser claro, con densidad, número de yodo y acidez bien determinadas y no debe dejar residuos cuando se calienta a más de 300°C.-

El aceite de madera chino (Tung-oil) debe tener también características bien determinadas para ser empleados en los barnices. No puede calentarse a temperaturas superiores a 200°C, y puede solidificarse por completo, aún en capas de cierto espesor, lo que no sucede con el aceite de linaza.-

#### **1.2.5.8 Barnices**

Se denominan barnices aislantes a base de aceites a aquellos que tiene en su composición un porcentaje grande de aceites vegetales. Se utilizan ampliamente ya sea para el barnizado de las telas aislantes como para la impregnación de los arrollamientos de motores, transformadores, etc. Y sirve para proteger el arrollamiento de las sollicitaciones mecánicas así como para mejorar el aislamiento.-

Se componen fundamentalmente de resinas, asfaltos, betunes o breas y ceras disueltas en líquidos apropiados, con adición de aceites secantes para acelerar el secado.-

---

<sup>22</sup> Semilla del lino.

Los barnices al aceite son de color amarillo o negro; se secan al aire o en el horno, la impregnación es por simple inmersión o en autoclave<sup>23</sup>.-

Los barnices amarillos tienen una mayor resistencia al aceite que los negros y poseen una mayor rigidez dieléctrica y una mayor resistencia al agua y al envejecimiento.-

Los barnices secados al aire son menos elásticos, pero más adhesivos; los secados al horno tienen una mayor elasticidad y resistencia al aceite y al calor.-

Las materias primas necesarias para la producción de barnices aislantes son: Aceites secantes, resinas, betún, secantes y disolventes.-

Las resinas pueden ser naturales o sintéticas. Las resinas naturales son en su mayor parte, de origen fósil, provenientes de la secreción de plantas resinosas. Se denominan a veces según la región de procedencia (Copal, Kauri, Manila, Dammar, Zanzíbar, etc.). Estas resinas son cocidas durante un cierto tiempo a 350°C, para hacerlas solubles en aceite.-

Las resinas sintéticas que se emplean en lugar de las naturales son el Glyptal, la baquelita y las resinas esterificadas (pega griega, desacidificada con glicerina).-

Para la obtención de barnices negros se emplea betún o sustancias similares.-

Con la adición, al aceite cocido de resinas sintéticas se producen barnices con características superiores a la de los barnices fabricados con resinas naturales.-

Las resinas del tipo fenol-formaldehído calentadas con aceite secante se combinan con éste provocando una notable polimerización, la cual permite un secado mucho más rápido que el que se puede conseguir con las resinas naturales.-

Las resinas alquílicas (gliceroftálica) pueden ser empleadas sin la adición de un aceite secante por que contienen los componentes ácidos de éstos aceites y poseen la propiedad de una notable polimerización.-

Otras numerosas resinas sintéticas pueden ser empleadas en la fabricación de barnices (urea-formaldehído, melamina-formaldehído, estireno polivinílico, resinas acrílicas y de siliconas).-

Los secantes son compuestos metálicos (linoleatos, ricinoleatos, estearatos de cobalto manganeso, etc.) que se añaden a las oleoresinas para favorecer el secado de la masa, cediendo su oxígeno. Las resinas o los betunes se disuelven en los aceites para constituir los barnices, pero éstos resultan muy viscosos sin la adición de disolventes (benzol, bencina, petróleo, trementina, etc.) que se evaporan completamente durante el secado y no influye en las características del barniz.-

#### **1.2.5.9 Esmaltes**

Son productos empleados para formar una vaina aislante, de pequeño espesor que sirve para proteger los conductores. Las condiciones que deben cumplir los esmaltes son: gran homogeneidad; fácil aplicación y adhesividad al metal; película continua y uniforme; resistencia a la acción de la humedad, agentes ácidos y alcalinos, solventes y aceites minerales aún calientes; resistencia al calor; gran conductividad térmica; inflamabilidad; y además óptimas características mecánicas y eléctricas, rigidez y resistividad.-

Fundamentalmente se fabrican sobre la base de aceites vegetales y resinas naturales o sintéticas; algunos esmaltes sintéticos no tienen en su composición aceites vegetales.-

#### **1.2.5.10 Siliconas**

Son compuestos orgánicos de silicio; es decir compuestos en los que a átomos de silicio se unen átomos de oxígeno y grupos orgánicos, como el metilo, el etilo, o el fenilo. Según las distintas posibilidades de esta unión, se obtienen compuestos con características diversas que pueden ser

<sup>23</sup> Recipiente de paredes gruesa y cierre hermético para realizar bajo presión una reacción industrial o la cocción o esterilización al vapor.



líquidos o gomosos, en el caso de los primeros grupos citados, y resinosos en el caso del fenilo. Estos compuestos poseen óptimas características eléctricas, que se mantienen inalterables, junto con algunas características mecánicas, para una vasta gama de temperaturas ( $-50^{\circ}\text{C}$  a  $+300^{\circ}\text{C}$ ) y de frecuencias. Son antihigroscópicas y químicamente inertes.-

#### **1.2.5.10.1 Aceites de siliconas**

Son líquidos incoloros inodoros de los que existen varios tipos de distinta viscosidad. Son óptimos para el aislamiento de transformadores. Se emplean para aumentar la resistividad superficial de los aisladores cerámicos, sobre los cuales se extiende, disueltos en un disolvente apropiado para obtener una capa muy fina. Se calienta luego el aislador hasta unos  $200^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, según el tipo de aceite empleado. No ataca ni reblandecen el caucho natural o sintético, ni a las resinas sintéticas, incluso a temperatura elevada. Se emplean también como lubricantes especialmente para bajas temperatura, y como líquido para el amortiguamiento de oscilaciones mecánicas (registrados de la banda sonora de películas cinematográficas). La constante dieléctrica de los aceites de silicona es de  $\epsilon_r=2,7$  y su factor de potencia es de  $0,0006$ .-

#### **1.2.5.10.2 Cauchos de silicona**

Están constituidos por un polímero a base de silicona con un catalizador y una sustancia de relleno.-

Los cauchos con siliconas mantienen sus características incluso después de un breve calentamiento a  $250^{\circ}\text{C}$ , y los conductores aislados mediante dichos caucho, pueden trabajar en una gama de temperaturas de  $-75^{\circ}\text{C}$  a  $+200^{\circ}\text{C}$ , aún en presencia de notable humedad.-

Los cauchos de siliconas tienen el único inconveniente de no ser elásticos y resultan reblandecidos por los aceites. El valor de la constante dieléctrica es de  $\epsilon_r=3,6$  y del factor de potencia  $0,005\%$ .-

Su nombre comercial es **Sílastic**.-

#### **1.2.5.10.3 Resinas de silicona**

Las resinas de silicona son especialmente empleadas como material cementante para el tejido de vidrio o amianto y para la micanita<sup>24</sup>. Se suministran bajo la forma de barnices; es decir, disueltas en un disolvente, con las cuales se fabrican láminas y tubos impregnando tejidos de fibra de vidrio en forma continua bajo presión y temperatura.-

Para el esmaltado de los conductores las resinas no se prestan a un empleo directo, porque esto da lugar a un revestimiento demasiado duro, pero mezclando resinas de silicona con una adecuada resina sintética se obtiene esmaltes que permiten someter los conductores a temperaturas del orden de los  $180^{\circ}\text{C}$ , no siendo atacados por los aceites.-

Los barnices de silicona empleados para impregnación están constituidos por resinas disueltas en disolventes adecuados y los arrollamientos de hilos aislados mediante silicona, se impregnan por inmersión o en el vacío.-

#### **1.2.5.10.4 Mezclas de siliconas**

Las mezclas de siliconas (compound) tiene el mismo aspecto que los lubricantes grasos y están compuestas por aceites de siliconas y rellenos inorgánicos. Se emplean para mejorar o mantener el aislamiento superficial de contactos, de conectadores múltiples, de cajas de conexión para intemperie, para ajustar cables y recubrir arrollamientos sujetos a efluvios, para rellenar el soporte de transistores, etc..-

#### **1.2.5.11 Mica**

Se conocen con el nombre genérico de micas, ciertos minerales cuya composición química y propiedades mecánicas, caloríficas y eléctricas son muy

<sup>24</sup> Véase Mica (pag. 39).

variables, en general son compuestos de sílice, aluminato de potasio, hierro y magnesio, que se caracterizan por poder subdividirse (según un plano de clivaje<sup>25</sup>) en hojas o láminas flexibles que pueden llegar a tener hasta 0,005mm de espesor. La mica es uno de los materiales más aptos para ser usados como aislante o dieléctrico, no sólo por sus propiedades eléctricas (constante dieléctricas  $\epsilon_r$  entre 5 y 8; tensión de perforación aproximadamente 1000KV/cm) sino también por su inercia química, su inhigroscopicidad, su resistencia mecánica y especialmente por su resistencia a la acción del calor.-

Es interesante destacar que conviene evitar el contacto de la mica con los aceites aislantes pues el aceite penetra entre las láminas de la mica tendiendo a reducir la adherencia entre ellas y por consiguiente desintegrándola.-

- **Micanita**

La micanita es un aislante compuesto de láminas muy delgadas de mica, superpuestas y encoladas constituyendo grandes planchas de un cierto espesor.-

El barniz empleado para encolarlas fue durante mucho tiempo una solución de goma laca con alcohol, ahora se emplea resina glicital. También puede esparcirse la cola bajo la forma de polvo finísimo, sobre láminas, a medida que se van superponiendo, obteniéndose su fusión en caliente.-

Las resinas de siliconas son también empleadas en el encolado de micanitas, cuando se quiere mantener el aislamiento a temperaturas de 200°C.-

- **Micalex**

Para la fabricación de micalex se emplean recortes de mica triturados hasta obtener láminas muy pequeñas. Estas se mezclan con un vidrio fácilmente fusible, un borosilicato<sup>26</sup> mezclado con borato de plomo, la mezcla se comprime en prensa según la forma deseada y se lleva a la temperatura de 700°C aproximadamente; al enfriarse se obtiene una masa compacta, dura de color gris claro, que resulta un óptimo aislante incluso para RF y temperatura de 500°C.-

### **1.2.5.12 Vidrio**

El vidrio es la combinación de distintos constituyentes cuya naturaleza y proporción puede variar entre límites muy amplios, obteniéndose productos con características distintas. El constituyente base del vidrio es el sílice, bióxido de silicio que por sí solo puede constituir un tipo de vidrio, pero dada la dificultad de fusión 1.700°C, se agregan al sílice determinados compuestos, que rebajan el punto de fusión de la mezcla a 1.400°C o 1.500°C. Estos compuestos son: óxido de aluminio, boro, calcio, magnesio, potasio, sodio y en otros casos óxidos de bario, plomo y cinc.-

El vidrio, comúnmente empleado en la fabricación de las ampollas de las válvulas, está constituido por sílice y óxido de calcio y sodio. En la unión con los electrodos se emplean vidrios especiales a partir de bórax y borosilicatos. Otros vidrios especiales contienen una elevada proporción de óxido de plomo. Para la producción de hilo de vidrio se emplean aluminosilicatos. Los óxidos de potasio y sodio suelen también entrar en la composición del vidrio.-

La constante dieléctrica del vidrio depende del contenido de sílice: el vidrio corriente tiene una constante de  $\epsilon_r=8$ , aproximadamente, los borosilicatos de  $\epsilon_r=5$ , y la sílice fundida de  $\epsilon_r=3,7$ .-

Valores mucho más elevados de esta constante los tenemos en vidrios especiales. Se mantiene prácticamente constante al variar la frecuencia.-

<sup>25</sup> Operación que consiste en dividir ciertos metales en función de su estructura cristalográfica.

<sup>26</sup> Vidrio formado por anhídrido bórico y sílice, usado para la fabricación de objetos de cocina instrumentos de óptica.

### **1.2.5.13 Materiales cerámicos**

Son materiales que adquieren la consistencia deseada por medio de un tratamiento térmico, una vez fabricado el objeto, comprimiendo sus constituyentes en forma de polvo.-

En esta definición quedan comprendidos materiales que tiene aplicación no sólo como dieléctricos, sino también como transductores electromecánicos y como materiales magnéticos. Las ferritas<sup>27</sup> son materiales cerámicos.-

Los materiales cerámicos son frágiles, se rompen antes de que exista una apreciable deformación, la dilatación térmica de un material cerámico tiene notable importancia cuando se emplea dicho material en la construcción de condensadores o soportes de bobinas o cuando se efectúan soldaduras de los mismos con vidrios o metal.-

#### **1.2.5.13.1 Materiales cerámicos de baja constante dieléctrica**

- **Porcelana**

La composición de la porcelana es aproximadamente, el 27% de sílice, el 23% de feldespato<sup>28</sup> y el 50% de caolín. Los distintos componentes son finamente pulverizados y mezclados con agua, durante bastante tiempo, hasta obtener una pasta uniforme.

El caolín, un silicato de aluminio, asegura la plasticidad de la masa. El feldespato, un silicato de aluminio, sodio y potasio, tiene una función de fundente durante la cocción, disuelve a la sílice formando un vidrio, que constituye un retículo que retiene a los otros componentes.-

La constante dieléctrica media es de  $\epsilon_r=6$ ; el factor de potencia en la porcelana para altas tensiones es de 0,005, en las destinadas a bajas tensiones llega a 0,02. La porcelana para AT soporta tensiones de perforación de 250KV/cm, la de baja tensión 50KV/cm.-

Las porcelanas con un 95% de alúmina<sup>29</sup> tiene una elevada resistencia mecánica a los saltos de temperatura, y un factor de potencia de 0,0005. Se emplean como elementos aislantes en las bujías de los motores de explosión.-

- **Esteatita**

La esteatita o talco es un silicato de magnesio mineral. Mezclada con caolín y óxidos alcalinos forma una pasta que se somete a la cocción de 1400°C en una atmósfera oxidante.-

Este material cerámico es un buen dieléctrico para RF. Tiene una constante dieléctrica de  $\epsilon_r=6$ , un factor de potencia de 0,001 y posee una resistencia mecánica superior a la de la porcelana aunque se resiente como esta de los saltos de temperatura.-

#### **1.2.5.13.2 Materiales cerámicos de alta constante dieléctrica.**

El bióxido de titanio es el único material conocido desde mucho tiempo por estar dotado de una constante dieléctrica de  $\epsilon_r=100$ .-

El silicato de magnesio y el bióxido de titanio dieron lugar a los primeros materiales cerámicos con una constante dieléctrica próxima a 100 (**Condesa**, **Kerafar**) la adición al óxido de titanio de óxido de bario o magnesio, en proporción inferior a la necesaria para obtener los respectivos titanatos, dan lugar a una constante dieléctrica de  $\epsilon_r=150$  en el caso del bario y de 15 en el del magnesio.-

Estos materiales cerámicos son muy duros y refractarios, óptimos dieléctricos a RF (factor de potencia 0,0003), pero sus pérdidas aumentan notablemente a frecuencias bajas y la resistividad de masa disminuye a temperaturas superiores a 150°C. Presentan un coeficiente de temperatura negativo.-

<sup>27</sup> Véase Materiales para campos magnéticos alternos (pag. 57).

<sup>28</sup> Grupo de aluminosilicatos naturales de potasio, sodio y calcio, frecuentes en las rocas eruptivas.

<sup>29</sup> Óxido de aluminio, que constituye un grupo de piedras preciosas como el rubí, zafiro, etc..

El titanato de bario es el material cerámico más importante, descubierto más tarde, con una constante dieléctrica de  $\epsilon_r=1500$ , y con las investigaciones efectuadas sobre él se ha llegado a la obtención de una gran cantidad de materiales con características especiales, sustituyendo el bario o titanio por otros elementos o mezclando al titanio de bario óxidos dobles.-

#### 1.2.5.14 Materiales piezoeléctricos

**Piezoelectricidad:** La piezoelectricidad puede definirse como la propiedad que poseen algunas sustancias no conductoras, cristalinas (que no poseen centro de simetría), de presentar cargas eléctricas de signo contrario, en caras opuestas, cuando están sometidas a determinadas deformaciones mecánicas. El fenómeno es reversible, pues aplicando a las caras, una tensión eléctrica, se produce una deformación mecánica proporcional al potencial eléctrico.-

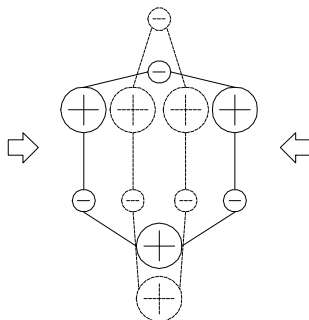


Figura 1-15. Proyección del hexágono atómico.

La deformación de un cristal no genera cargas eléctricas, pero produce un **desplazamiento de las cargas propias del mismo**; y en los cristales asimétricos, este desplazamiento provoca el llamado efecto **piezoeléctrico**.-

La explicación del fenómeno piezoeléctrico, y referida concretamente al cuarzo ( $\text{Si-O}_2$ ), puede esquematizarse así:

La célula unitaria de cuarzo está compuesta por 6 átomos de oxígeno, con dos cargas negativas cada uno, y 3 de silicio con cuatro cargas positivas cada uno.-

La proyección del hexágono atómico (Figura 1-15) muestra los 3 átomos de silicio, y solo 3 de los 6 de oxígeno, dado que ellos se superponen 2 a 2.-

Si se ejerce una presión, por ejemplo, en el sentido indicado por las flechas, se producen una deformación de la célula; un desplazamiento de las cargas, y el equilibrio eléctrico resulta alterado. Como consecuencia aparecen cargas de signo opuesto en la parte superior e inferior de la célula esquematizada.-

Muchas sustancias cristalinas poseen propiedades piezoeléctricas, pero solamente algunas se usan a escala industrial; entre éstas, el cuarzo, la Sal de Rochelle, el titanato de bario, el fosfato dihidrogenado de amonio (ADP), etc...-

De los cristales piezoeléctricos se cortan láminas que se usan fundamentalmente como patrones (o controles) de frecuencia, o como transductores.-

Estas láminas, que se cortan siguiendo determinadas reglas, vinculadas a los ejes cristalográficos, se suelen llamar simplemente **cristales**.-

Los cristales se usan como patrones de frecuencia, cuando la frecuencia de resonancia mecánica de los mismos es muy estable (por ejemplo, láminas convenientemente cortadas de un cristal de cuarzo); estos cristales al vibrar generan una tensión proporcional a la amplitud de la vibración, y de la misma frecuencia que ésta; y provistos de electrodos convenientes, tienen las características de un circuito resonante de muy alto  $Q$  y alta relación  $L/C$ , y se utilizan en circuitos filtros, o como elementos de realimentación selectiva en circuitos osciladores.-

El circuito equivalente de un cristal es el siguiente:

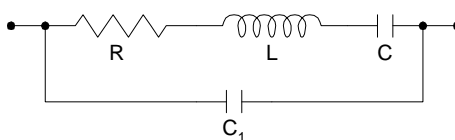


Figura 1-16. Circuito equivalente de un cristal.

La capacidad en paralelo  $C_1$  corresponde a los electrodos soportes y al cableado, y puede llegar a tener un valor importante.-

Esta capacidad hace que el cristal presente dos modos de resonancia: una resonancia serie  $f_s$  y otra paralelo  $f_p$  (Figura 1-17). Entre las dos suele haber una diferencia del orden de 1 a 2KHz. Normalmente se usa el modo de resonancia serie.-

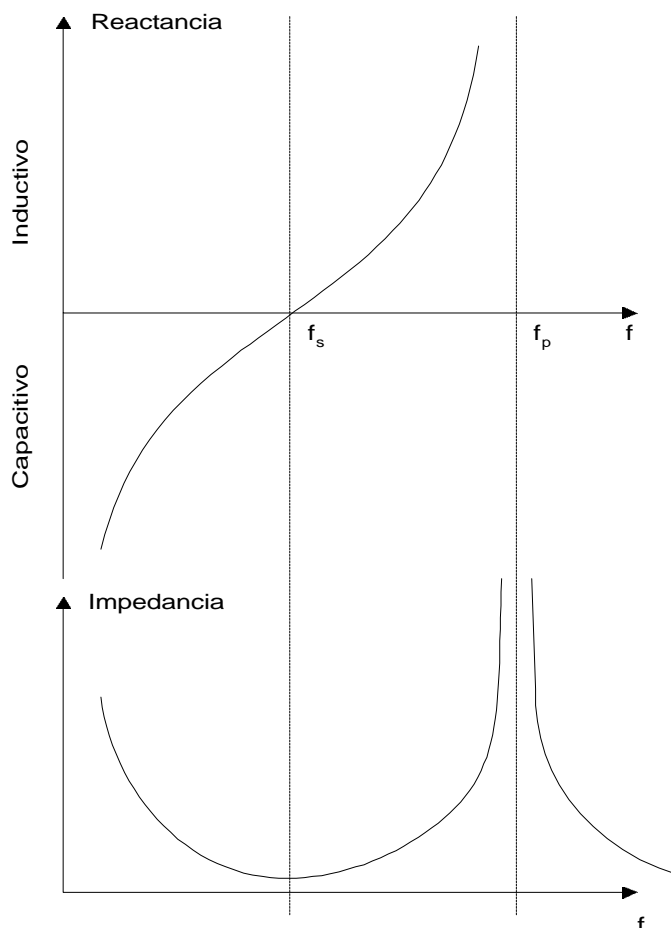


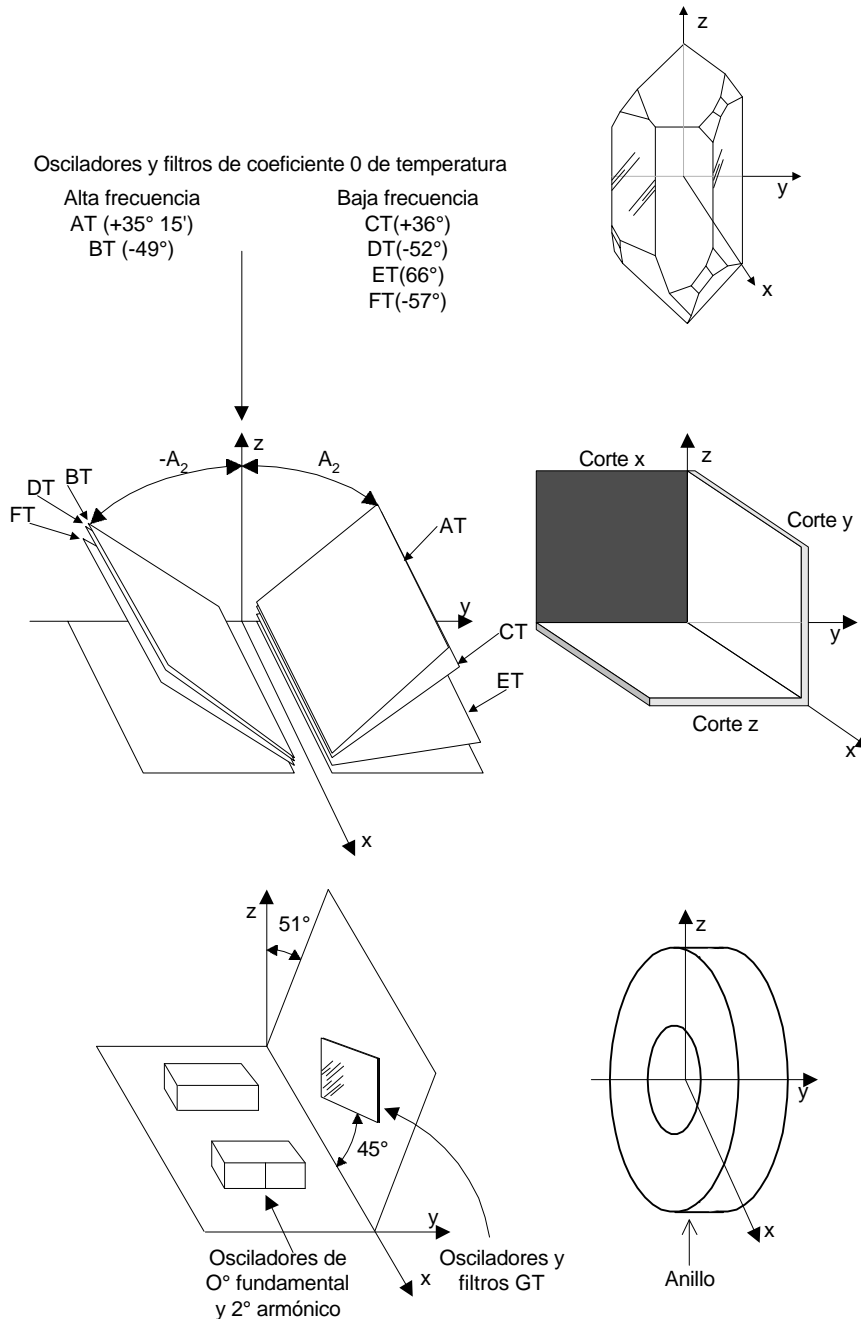
Figura 1-17. Variación de la reactancia y la impedancia en un cristal.

Los cristales piezoeléctricos se usan también como transductores, debido a que el efecto piezoeléctrico posibilita la conversión de energía mecánica en eléctrica o viceversa; ejemplos típicos son los cristales piezoeléctricos usados en micrófonos, fonocaptadores, patrones de deformación, etc.. Para algunas de estas aplicaciones se usa el cuarzo, pero su efecto piezoeléctrico es relativamente débil, por lo que es más común el uso de la Sal de Rochelle, de las cerámicas piezoeléctricas, etc..-

- **El cuarzo**

El cuarzo, bióxido de silicio ( $\text{Si-O}_2$ ), es una sustancia que cristaliza en el sistema romboédrico, a simetría ternaria, es decir formando prismas hexagonales cerrados en sus extremos por romboides, con un eje óptico **Z**, tres ejes eléctricos **X**, paralelos a los lados del hexágono, y tres ejes mecánicos **Y**, perpendiculares a los lados del hexágono. La estructura cristalográfica del cuarzo permite obtener, mediante cortes, láminas con propiedades piezoeléctricas. Estas láminas (cristales), con sus correspondiente electrodos, tienen las

características de un circuito resonante con  $Q$  varias veces mayor que el que puede obtenerse con un circuito convencional de constante concentradas; la frecuencia de resonancia es, fundamentalmente, función de las dimensiones del cristal, del montaje y de la orientación del corte; esto último determina además, la actividad, el coeficiente de temperatura, y otras características del cristal. Un cristal de cuarzo tiene varias resonancias, pues las oscilaciones pueden ser, longitudinales, transversales, de corte o de flexión. Dando al cristal, y al soporte del mismo, formas adecuadas, pueden acentuarse un modo de resonancia y atenuarse las llamadas resonancias secundarias.



**Figura 1-18. Corte del cuarzo. Coeficiente cero de temperatura T.**

Los primeros cristales utilizados, se obtienen de cortes perpendiculares a los ejes **X** e **Y**, cortes **X** e **Y** respectivamente. El corte **Y**, tiene un coeficiente de temperatura elevado y discontinuo; el corte **X** un coeficiente de temperatura también alto, pero mucho más continuo, lo que

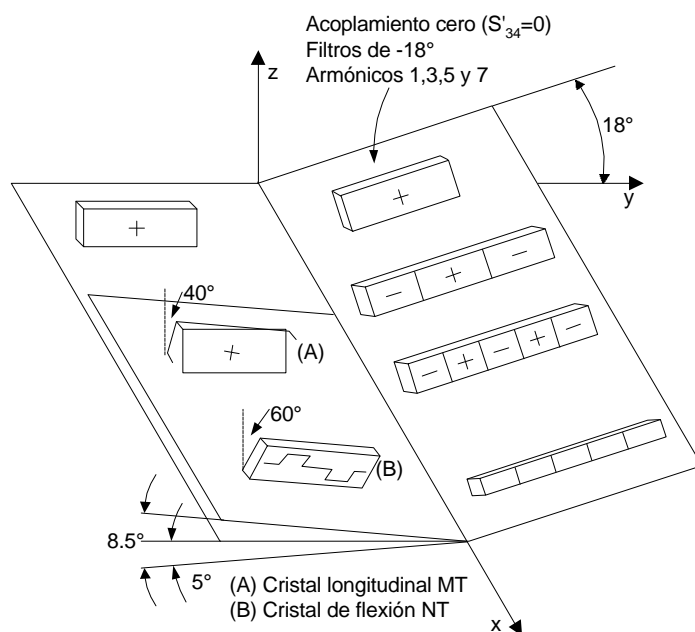
permite obtener una buena estabilidad cuando se usan hornos termostáticos. Sin embargo, este corte es menos activo que el Y.

En la actualidad existen muchos otros modos de corte. Para frecuencias comprendidas entre 500KHz y 6MHz, se usan preferentemente el corte AT (Figura 1-18); este corte tiene un excelente comportamiento térmico, pero por encima de los 6MHz los cristales son muy delgados y difíciles de obtener. Para frecuencias entre los 6 y 12MHz se usa preferentemente el corte BT.

Para bajas frecuencias, del orden de 50 a 500KHz se usan los cortes CT y DT; y para frecuencias del orden de los 100KHz se recomienda el corte GT.

Cortes y pulidos especiales permiten que el cristal vibre en una armónica de su fundamental, se pueden obtener cristales con cortes AT y BT para funcionar en la 3<sup>ra</sup>; 5<sup>ta</sup> y hasta 7<sup>ma</sup> armónica (Figura 1-19). Cuando se usan cristales funcionando en armónicas, debe colocarse un circuito sintonizado en el oscilador para eliminar la frecuencia fundamental, y las otras armónicas, pues el cristal puede oscilar en una frecuencia que no es la deseada.

Los cristales se cortan utilizando discos de acero con esquiras de diamante engarzadas en su periferia, o bien utilizando discos de acero de 0,5mm de espesor, alimentados con agua y glicerina con carborúndum<sup>30</sup> en polvo en suspensión. Los cristales obtenidos, después de los sucesivos cortes, son rigurosamente examinados y pulidos hasta obtener las dimensiones deseadas.



**Figura 1-19. Corte del cuarzo. Bajo coeficiente de temperatura T. Filtros de  $+5^\circ$ .**

Para el montaje, pueden metalizarse las caras del cristal en este caso se baja la frecuencia de resonancia del mismo.

El metalizado puede obtenerse cubriendo las caras con un barniz con óxido de plata en suspensión, y calentando los cristales, barnizados y secos a una temperatura del orden de los  $300^\circ\text{C}$ , con lo cual el óxido de plata se reduce a plata metálica; otras veces la metalización de las caras puede obtenerse evaporando al vacío plata, oro o aluminio. A los electrodos así obtenidos se sueldan los conductores de conexión con una aleación de bajo punto de fusión. Los puntos de soldadura deben corresponder a nudos de vibración.

<sup>30</sup> Carburo de silicio artificial, utilizado como abrasivo.

Si se desea disminuir las pérdidas puede encerrarse el cristal en una ampolla de vidrio, en la que se hace el vacío, ya que el aire atenúa las oscilaciones del cristal.

Otra forma de montaje es colocar los cristales entre electrodos mantenidos contra las caras del cristal, en contacto, o a una mínima distancia de las mismas. El ajuste de esta pequeña distancia permite variaciones de la frecuencia de oscilación, del orden del 0,3%.

Una vez montado el cristal, puede controlarse la frecuencia de resonancia y la presencia de resonancias no deseadas, con un montaje como el de la Figura 1-20 o similar. El mismo consiste en un oscilador de frecuencia variable, a cuya salida se conecta un cristal **Q** en serie con una resistencia **R**, un voltímetro de alta impedancia conectado entre los extremos de la resistencia indica tensión máxima cuando la frecuencia del oscilador coincide con la resonancia en serie; y tensión mínima cuando coincide con la de resonancia paralelo. Si se sustituye el cristal por una resistencia variable puede determinarse el valor de la resistencia equivalente del cristal.

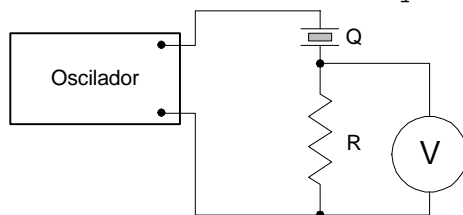


Figura 1-20. Montaje con resistencia.

- **Cristales solubles**

Son cristales artificiales que se obtienen por cultivo.

Se parte de soluciones saturadas en caliente, y por enfriamiento o evaporación se forman y crecen dentro de la misma, los cristales. El crecimiento debe ser lento si se desean obtener cristales perfectos.

Para acelerar el proceso, se puede partir de trozos cortados de cristales grandes que actúan como gérmenes.

De los cristales solubles, el más corriente es la **Sal de Rochelle (Sal de Seignette)**, **tartrato doble de sodio y potasio** ( $K, Na, C_4 O_6 H_2 O$ ).

Fue obtenido por primera vez, por un farmacéutico de la Rochelle (Francia), de nombre *Seignette*. Es un cristal ortorrómbico que debe sus propiedades físicas al ácido tartárico del cual proviene.

La sal de Rochelle es estable entre el 35% y el 85% de humedad relativa.-

Por encima del 85% de humedad el cristal absorbe agua de la atmósfera y se disuelve lentamente. Para aminorar los efectos de la humedad se cubren los cristales con ceras que retardan, más bien, que evitan la deshidratación. La máxima temperatura a que puede estar expuesto este cristal es del orden de 45°C. A los 55°C pierden de forma permanente sus propiedades piezoeléctricas.

El corte de los cristales de sal de Rochelle como el de cualquier otro cristal soluble, se efectúa preferentemente, con un dispositivo similar a una sierra sinfín, provista de un sutil hilo de acero cuya principal misión es aportar agua, la que por disolución efectúa el corte, en la zona de contacto del hilo con el cristal, ya que el hilo no debe efectuar ninguna acción abrasiva sobre el cristal (Figura 1-21).

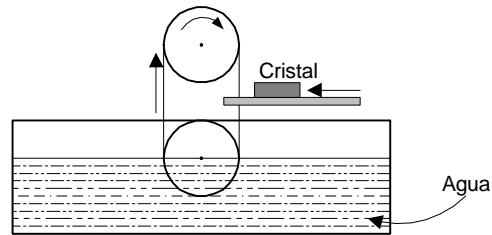
Las láminas de sal de Rochelle pueden montarse para trabajar a la torsión o a la flexión, y según cual sea el montaje, varía la orientación del corte.

Después de cortado, y antes de utilizarlo, los cristales se mantienen un cierto tiempo en armarios, a temperaturas controladas.

Para poder conectarlo al circuito eléctrico, se pegan a las dos caras de las láminas de cristal, electrodos, consistentes en hojitas de estaño o aluminio.



Otros cristales piezoeléctricos solubles son: el **tartrato de etilendiamonio**, **tartrato de potasio**, etc..-



**Figura 1-21. Corte de cristal con sierra sinfín.**

- **Cerámicas**

El titanato de bario es una cerámica que presenta propiedades piezoeléctricas.

Los materiales piezoeléctricos de titanato de bario, se fabrican por procesos cerámicos, y se los polariza enfriándolos desde temperaturas superiores a las de Curie, en un campo eléctrico intenso.

Se usan como transductores; su sensibilidad piezoeléctrica es algo inferior a la sal de Rochelle, pero tienen otras ventajas como: gran resistencia mecánica, resistencia a la humedad, y posibilidad de usarse dentro de un rango de temperaturas mayor, (hasta los 70°C de temperatura; para temperaturas superiores puede usarse el titanato de plomo).



## 2 CAPÍTULO II

### 2.1 Materiales magnéticos

#### 2.1.1 Propiedades magnéticas

Las propiedades magnéticas de los materiales tienen su origen en la existencia de dipolos magnéticos en los átomos, los que son el resultado del movimiento de los electrones. Un campo magnético exterior tiende a alinear estos dipolos magnéticos según su misma dirección con la consiguiente aparición de momentos magnéticos inducidos en el material. El momento magnético total por unidad de volumen se denomina magnetización **M** del material, y es equivalente a la polarización **P** de los dieléctricos.-

<i>Sustancia</i>	<i>Grupo</i>	<i>Permeabilidad relativa <math>\mu_r</math></i>
Bismuto	Diamagnético	0,99983
Plata	Diamagnético	0,99998
Plomo	Diamagnético	0,999983
Cobre	Diamagnético	0,999991
Agua	Diamagnético	0,999991
Vacío	No magnético	1
Aire	Paramagnético	1,00000004
Aluminio	Paramagnético	1,00002
Paladio	Paramagnético	1,0008
Polvo de permalloy 2-81 (2Mo, 81Ni) <sup>31</sup>	Ferromagnético	130
Cobalto	Ferromagnético	250
Níquel	Ferromagnético	600
Ferroxcube 3 (ferrite Mn, Zn)	Ferromagnético	1500
Acero Dulce (0,2C)	Ferromagnético	2000
Hierro (impurezas 0,2)	Ferromagnético	3000
Hierro silicio <sup>32</sup> (4Si)	Ferromagnético	7000
Permalloy 78 (78,3Ni)	Ferromagnético	100000
Hierro paraafinado	Ferromagnético	200000
Supermalloy (5Mi, 79Ni)	Ferromagnético	1000000

**Tabla 2-1. Características magnéticas de algunos materiales.**

En un campo magnético pueden definirse dos magnitudes vectoriales, la intensidad de campo magnético **H** y la inducción magnética **B**.-

Estas dos magnitudes están vinculadas por la siguiente relación:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$\mu$  es la llamada permeabilidad del material, y puede expresarse como

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Siendo  $\mu_0$  la permeabilidad del vacío, y  $\mu_r$  la permeabilidad relativa del material con respecto al vacío (para el vacío  $\mu_r=1$ ).-

El valor de  $\mu_0$  depende del sistema de unidades. En el sistema C.G.S. es  $\mu_0=1$ . En el sistema M.K.S. racionalizado es:  $\mu_0=4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  [Hy/m].-

En el vacío:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}$$

En un sólido se puede plantear la siguiente relación:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \cdot \mathbf{H} + \mu_0 \cdot \mathbf{M}$$

<sup>1</sup> Composición porcentual. El resto es hierro e impurezas.

<sup>2</sup> Utilizado en los transformadores industriales.

el segundo término  $\mu_0 \cdot \mathbf{M}$  es debido a la aparición de momentos dipolares en un sólido, cuando está sumergido en un campo magnético, y es un campo adicional de inducción magnética que se suma a la inducción en el vacío absoluto.-

Para numerosas sustancias en las que la magnetización es proporcional a  $\mathbf{H}$ , puede definirse la susceptibilidad magnética del medio  $X_m$ , que es la relación entre  $\mathbf{M}$  y  $\mathbf{H}$ .-

$$\mathbf{M} = X_m \cdot \mathbf{H}$$

$X_m$  es un número puro puesto que  $\mathbf{M}$  y  $\mathbf{H}$  tienen las mismas unidades.-

Teniendo en cuenta lo anterior, puede escribirse:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot (1 + X_m) \cdot \mathbf{H}$$

por lo tanto:

$$\mathbf{m} = \mu_0 \cdot (1 + X_m)$$

Todas las sustancias conocidas son conductores del flujo magnético, pero de acuerdo al valor de su susceptibilidad magnética las sustancias pueden clasificarse en: **paramagnéticas**, cuando  $X_m$  es positivo y mucho menor que 1; en **diamagnéticas** cuando  $X_m$  es negativo, y también pequeño comparado con 1; y en **ferromagnéticas**, cuando  $X_m$  es positivo y muy grande. Sin embargo en las sustancias ferromagnéticas  $\mathbf{M}$  no es exactamente proporcional a  $\mathbf{H}$ , de modo que  $X_m$  no es una constante, salvo en un pequeño intervalo de valores de  $\mathbf{H}$ .-

Teniendo en cuenta la expresión de la permeabilidad, se ve que:

- En las sustancias diamagnéticas  $\rightarrow \mu < \mu_0$
- En las sustancias paramagnéticas  $\rightarrow \mu > \mu_0$
- En las sustancias ferromagnéticas  $\rightarrow \mu \gg \mu_0$

Los materiales diamagnéticos se caracterizan por magnetizarse negativamente, es decir que los momentos magnéticos se oponen al campo aplicado, haciendo que la inducción magnética dentro del sólido sea menor que la inducción fuera de él.-

Entre los materiales diamagnéticos pueden mencionarse: el oro, la plata, el mercurio, el cobre, el plomo, el bismuto, etc..-

El diamagnetismo no tiene aplicaciones muy importantes en la ingeniería.-

Los materiales paramagnéticos se caracterizan por magnetizarse en el mismo sentido del campo aplicado.-

Entre los materiales paramagnéticos pueden mencionarse: el platino, el aluminio, el cromo, el sodio, el manganeso, etc..-

Tanto en los materiales diamagnéticos como en los paramagnéticos la magnetización desaparece al desaparecer el campo aplicado.-

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por magnetizarse en el mismo sentido del campo aplicado y por adquirir altos valores de magnetización, aún en campos de pequeña intensidad. En estos materiales la magnetización no desaparece totalmente al desaparecer el campo aplicado. Desde el punto de vista magnético, los materiales ferromagnéticos son los más importantes. Los típicos materiales ferromagnéticos son: el hierro, el níquel y el cobalto. Corrientemente a los materiales ferromagnéticos se les llama simplemente materiales magnéticos.-

La Tabla 2-1, muestra las características magnéticas de algunos materiales.-

En el sistema M.K.S. racionalizado,  $\mathbf{H}$  y  $\mathbf{M}$  se miden en amperios/metro y  $\mathbf{B}$  Weber/metro<sup>2</sup>. La permeabilidad  $\mu$  tiene las dimensiones Weber/Amperio·metro o Henrio/metro. La susceptibilidad y la permeabilidad relativa no tienen dimensión.-

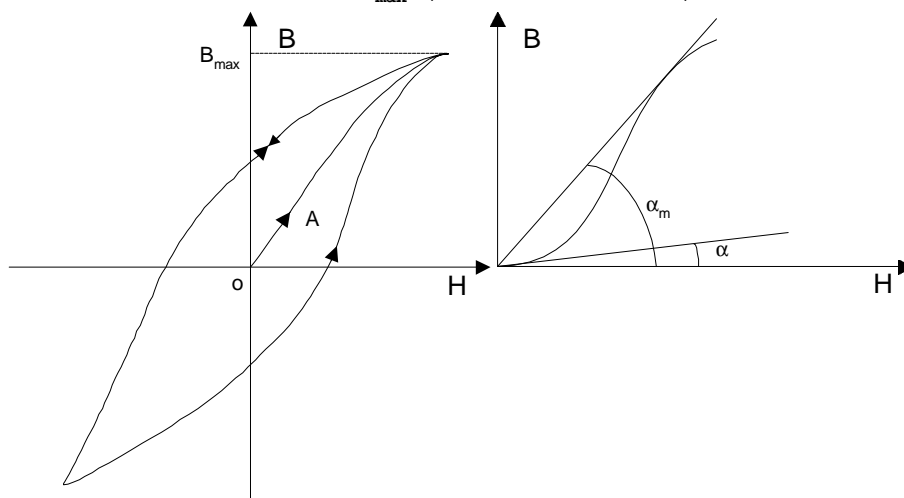
Para obtener  $\mathbf{H}$  en Oersted multiplíquese  $\mathbf{H}$  en A/m por  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-3}$ .-

Para obtener  $\mathbf{B}$  en Gauss multiplíquese  $\mathbf{B}$  en Weber/m<sup>2</sup> por  $10^4$ .-

Existe una temperatura llamada de **Cuivre** o **punto de Curie**, por encima de la cual los materiales ferromagnéticos se vuelven paramagnéticos.-

Esta característica es reversible, pues los materiales recuperan sus propiedades ferromagnéticas cuando su temperatura desciende por debajo del punto de Curie.-

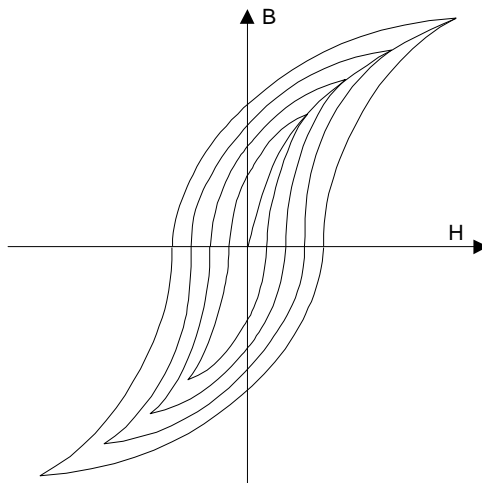
Cuando un material magnético (ferromagnético), previamente desmagnetizado, se somete a la acción de un campo magnético de intensidad creciente, la inducción magnética crece de acuerdo con la curva OA (Figura 2-1), hasta alcanzar un valor máximo  $B_{\text{máx}}$  (B de saturación).-



**Figura 2-1. Ciclo de histéresis con curva virgen.**

Esta curva se denomina curva virgen o curva de primera magnetización. De la misma se deduce que la permeabilidad  $\mu = B/H$  depende del campo aplicado. La pendiente de la curva en el origen es la permeabilidad inicial  $\mu_i$ , mientras que la permeabilidad máxima  $\mu_{\text{max}}$  corresponde a la pendiente de la tangente a la curva que pasa por el origen; (normalmente los valores de  $\mu$  que dan los fabricantes para distintos materiales corresponden a las permeabilidades máximas de los mismos).-

Debe observarse que la permeabilidad  $\mu$  (permeabilidad normal) no es la pendiente de la curva, sino el cociente  $B/H$ . La pendiente de la curva  $dB/dH$  es la llamada permeabilidad diferencial.-



**Figura 2-2. Ciclos de histéresis generados por un campo variable decreciente.**

Si se supone ahora que el campo magnético de intensidad creciente, al llegar a un determinado valor comienza a disminuir hasta hacerse cero, puede verse que la inducción magnética no retrocede siguiendo la curva de primera magnetización, sino que lo hace según una curva más alta, es decir que se produce un retraso. Este retraso se llama **histéresis**, y como consecuencia del mismo, cuando el campo se anula, B no es cero, sino que conserva un cierto valor  $B_r$  llamado **magnetismo remanente**, o simplemente **remanencia**.-

Para disminuir este magnetismo remanente, es necesario aplicar un campo opuesto al anterior. El valor del campo que anula totalmente al magnetismo remanente se llama **fuerza coercitiva**.-

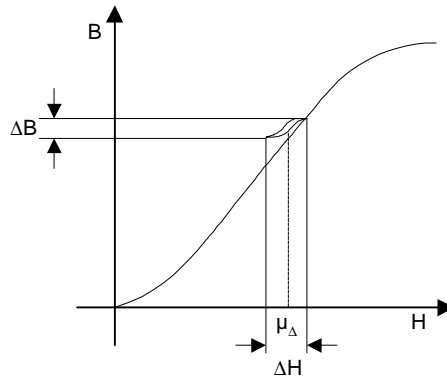


Figura 2-3. Campo alterno superpuesto a un campo continuo.

Si se hace variar cíclicamente el campo, en un sentido y en el otro, se obtiene el llamado lazo o ciclo de histéresis, si la sustancia se ha llevado a la saturación en los dos extremos, el lazo resultante, es el lazo o ciclo mayor de histéresis. El magnetismo remanente correspondiente a este lazo mayor de histéresis se llama **retentividad**, mientras que la fuerza coercitiva de este mismo lazo se llama **coercitividad**, es decir que la retentividad es el valor máximo que puede alcanzar el magnetismo remanente, y la coercitividad es el valor máximo de la fuerza coercitiva.-

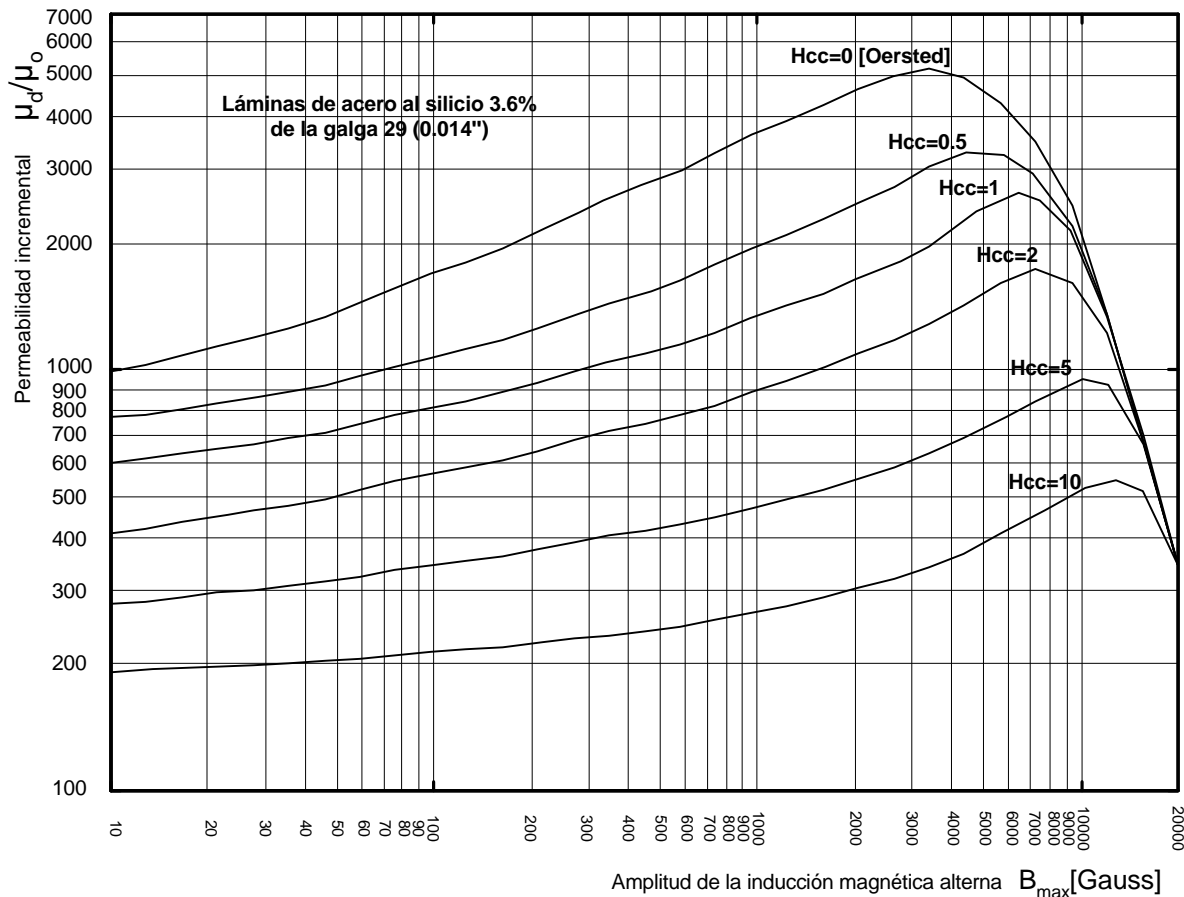


Figura 2-4. Permeabilidad relativa de laminas de hierro-silicio al 3,6%.

Si se hace cíclicamente al campo sobre rangos cada vez menos amplios, partiendo de los valores de saturación, se obtiene una serie de lazos o ciclos menores de histéresis (Figura 2-2). El lugar geométrico de los extremos de estos lazos es la llamada curva normal de magnetización, curva

muy útil porque se la puede reproducir muy fácilmente y porque es la característica de cada tipo de material magnético.-

La curva normal de magnetización, es muy parecida a la curva de primera magnetización, y puede coincidir con la misma.-

Un caso interesante se presenta cuando un material magnético está sometido a la acción de un campo magnético continuo sobre el que se ha superpuesto otro campo generado por una corriente alterna.-

En estas condiciones, el ciclo de magnetización esta construido por un lazo o ciclo de histéresis pequeño y desplazado, como puede verse en la Figura 2-3.-

La permeabilidad a la componente alterna se define como permeabilidad incremental  $\mu_{\Delta}$  y esta determinada por la pendiente de la línea que une los extremos de este pequeño lazo de histéresis.-

$$m_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

El caso límite, al tender  $\Delta H$  a cero, es la permeabilidad diferencial  $\mu_d$ .-

En la Figura 2-4 se gráfica la permeabilidad incremental relativa ( $\mu_{\Delta}/\mu_0$ ) en función de la amplitud de la inducción magnética alterna.-

### 2.1.2 Pérdidas en los materiales magnéticos

En los materiales magnéticos sometidos a la acción de flujos constantes, prácticamente no se producen pérdidas de energía, a menos que se excite y desexcite muy frecuentemente; mientras que en los materiales magnéticos sometidos a la acción de flujos alternos, sí se producen pérdidas, y estas suelen ser importantes. Las mismas se deben a las siguientes causas:

- A) A la tendencia del material a conservar su magnetización y/o oponerse a toda variación de la misma. Estas son las llamadas pérdidas por histéresis.
- B) A las corrientes (corrientes de Foucault) que se inducen en el material magnético como consecuencia del flujo variable. Estas son las llamadas pérdidas por corriente de Foucault.

Para magnetizar un material, es necesario suministrarle una cierta energía por unidad de volumen, y puede demostrarse que esta energía es proporcional a la superficie del ciclo de histéresis. Para demostrar esto, se supone un trozo de hierro de sección  $S$  y longitud  $l$  sobre el cual se ha arrollado  $N$  espiras (Figura 2-5).-

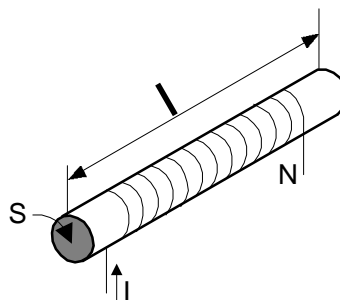


Figura 2-5. Al circular  $I$  por el arrollamiento provoca un flujo  $\phi$ .

Una corriente  $I$  circulando por las espiras produce un flujo  $\Phi$ . La f.e.m. necesaria para provocar la circulación de corriente será:

$$E = R \cdot I + N \cdot \frac{df}{dt}$$

siendo:

$$f = B \cdot S$$

y

$$N = \frac{H \cdot l}{4 \cdot p \cdot I}$$

la energía disipada durante un período  $T_1$ - $T_2$  será:

$$\int_{T_1}^{T_2} E \cdot I \cdot dt = \int_{T_1}^{T_2} R \cdot I^2 \cdot dt + \int_{T_1}^{T_2} S \cdot \frac{dB}{dt} \cdot \frac{H \cdot \ell \cdot I}{4 \cdot p \cdot I} \cdot dt = \int_{T_1}^{T_2} R \cdot I^2 \cdot dt + \frac{S \cdot \ell}{4 \cdot p} \cdot \int_{T_1}^{T_2} H \cdot dB$$

pero:

$$\int H \cdot dB$$

representa la superficie comprendida entre las dos curvas de magnetización ascendente y descendente. Es decir que en los cuerpos magnéticos sometidos a la acción de campos variables hay una pérdida de energía por histéresis, y por ciclo; proporcional al volumen del cuerpo y a la superficie del ciclo de histéresis. Esta pérdida de energía por unidad de volumen de material, por ciclo está expresado por la fórmula empírica de **Steinmetz**

$$W_h = \eta \cdot B_{\max}^k \cdot 10^{-7} \text{ [w/cm}^3\text{]}$$

en donde  $\eta$  es un coeficiente característico del material (para el hierro dulce  $\eta=0,00054$ ; para el acero  $\eta=0,0337$ ),  $B_{\max}$  la inducción máxima (en Gauss), y  $k$  una constante empírica de valor próximo a 1,6.-

Además de las pérdidas por histéresis, se producen otras por efecto Joule, debido a las corrientes de Foucault que se inducen en el material cuando está sometido a campos alternos. Estas pérdidas dependen de la resistividad del material, y para reducirlas se utilizan los materiales magnéticos en forma de chapas delgadas y aisladas eléctricamente con el objeto de dificultar el paso a las corrientes de Foucault.-

Las pérdidas por corriente de Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, al cuadrado de la densidad de flujo, y al cuadrado del espesor de las chapas.-

$$W_F = e \cdot (f \cdot B_{\max} \cdot d)^2$$

Las pérdidas totales, suma de las de histéresis y de Foucault, suelen expresarse en Vatios por unidad de peso, lo que es muy conveniente y práctico.-

Espesor de chapas en mm.	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
Armature	2,25	2,42	2,60	2,77	2,95	3,32
Electric	2,04	2,17	2,30	2,43	2,57	2,88
Special Electric	1,78	1,88	1,98	2,05	2,12	2,25
Tranformer	1,44	1,54	1,63	1,77	1,79	1,93

**Tabla 2-2 Pérdidas en el núcleo en [w/Kg] para B=10.000Gauss y f=50Hz**

Normalmente los fabricantes de materiales magnéticos dan valores de pérdidas en vatios por kilogramo, para determinados valores de inducción y frecuencia, en la practica, 10.000Gauss y 50 o 60Hz. Y se entiende que las pérdidas en las chapas que suministran, no sobrepasan esos valores.-

Existen tablas que dan coeficientes de corrección que permiten obtener las pérdidas a otros valores de frecuencia e inducción.-

Espesor de chapas en mm.	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
Armature	2,86	3,10	3,35	3,60	3,85	4,36
Electric	2,57	2,75	2,93	3,11	3,30	3,74
Special Electric	2,22	2,34	2,47	2,58	2,68	2,86
Tranformer	1,80	1,92	2,04	2,14	2,24	2,42

**Tabla 2-3 Pérdidas en el núcleo en [w/Kg] para B=10.000Gauss y f=60Hz**

Es interesante recordar, que todas estas pérdidas se traducen en calor, con la consiguiente sobre elevación de temperatura del material.-

En las Tabla 2-2 y Tabla 2-3 se muestran valores de pérdidas en chapas comerciales dados por un fabricante, y en la Tabla 2-4 se dan valores de corrección para distintas frecuencias e inducciones.-



Inducción	frecuencia (Hertz)							
Gauss	25	40	50	60	80	100	160	250
20	0.60x10 <sup>-6</sup>	0,10x10 <sup>-5</sup>	0,13x10 <sup>-5</sup>	0,16x10 <sup>-5</sup>	0,22x10 <sup>-5</sup>	0,28x10 <sup>-5</sup>	0,47x10 <sup>-5</sup>	0,80x10 <sup>-3</sup>
16	.17x10 <sup>-5</sup>	.30x10 <sup>-5</sup>	.36x10 <sup>-5</sup>	.46x10 <sup>-5</sup>	.64x10 <sup>-5</sup>	.80x10 <sup>-5</sup>	.14x10 <sup>-5</sup>	.24x10 <sup>-4</sup>
25	.50x10 <sup>-5</sup>	.80x10 <sup>-5</sup>	.10x10 <sup>-4</sup>	.12x10 <sup>-4</sup>	.18x10 <sup>-4</sup>	.23x10 <sup>-4</sup>	.40x10 <sup>-4</sup>	.72x10 <sup>-4</sup>
40	.14x10 <sup>-4</sup>	.23x10 <sup>-4</sup>	.28x10 <sup>-4</sup>	.35x10 <sup>-4</sup>	.51x10 <sup>-4</sup>	.64x10 <sup>-4</sup>	.12x10 <sup>-4</sup>	.21x10 <sup>-3</sup>
64	.41x10 <sup>-4</sup>	.65x10 <sup>-4</sup>	.82x10 <sup>-4</sup>	.10x10 <sup>-3</sup>	.15x10 <sup>-3</sup>	.18x10 <sup>-3</sup>	.32x10 <sup>-3</sup>	.58x10 <sup>-3</sup>
100	.10x10 <sup>-3</sup>	.18x10 <sup>-4</sup>	.22x10 <sup>-3</sup>	.26x10 <sup>-3</sup>	.38x10 <sup>-3</sup>	.47x10 <sup>-3</sup>	.80x10 <sup>-3</sup>	.15x10 <sup>-2</sup>
160	.28x10 <sup>-3</sup>	.44x10 <sup>-3</sup>	.56x10 <sup>-3</sup>	.66x10 <sup>-3</sup>	.92x10 <sup>-3</sup>	.12x10 <sup>-2</sup>	.21x10 <sup>-2</sup>	.30x10 <sup>-2</sup>
250	.64x10 <sup>-3</sup>	.10x10 <sup>-2</sup>	.13x10 <sup>-2</sup>	.16x10 <sup>-2</sup>	.22x10 <sup>-2</sup>	.30x10 <sup>-2</sup>	.50x10 <sup>-2</sup>	.90x10 <sup>-2</sup>
400	.15x10 <sup>-2</sup>	.26x10 <sup>-2</sup>	.30x10 <sup>-2</sup>	.38x10 <sup>-2</sup>	56x10 <sup>-2</sup>	.72x10 <sup>-2</sup>	.12x10 <sup>-1</sup>	.22x10 <sup>-1</sup>
640	.35x10 <sup>-2</sup>	.62x10 <sup>-2</sup>	.75x10 <sup>-2</sup>	.93x10 <sup>-2</sup>	.13x10 <sup>-1</sup>	.17x10 <sup>-1</sup>	.30x10 <sup>-1</sup>	.53x10 <sup>-1</sup>
1.000	.74x10 <sup>-2</sup>	.13x10 <sup>-1</sup>	.16x10 <sup>-1</sup>	.22x10 <sup>-1</sup>	.28x10 <sup>-1</sup>	.36x10 <sup>-1</sup>	.61x10 <sup>-1</sup>	.11
1.600	.10x10 <sup>-1</sup>	.28x10 <sup>-1</sup>	.36x10 <sup>-1</sup>	.43x10 <sup>-1</sup>	.60x10 <sup>-1</sup>	.76x10 <sup>-1</sup>	.14	.26
2.000	.24x10 <sup>-1</sup>	.40x10 <sup>-1</sup>	.52x10 <sup>-1</sup>	.62x10 <sup>-1</sup>	.88x10 <sup>-1</sup>	.11	.20	.30
2.500	.34x10 <sup>-1</sup>	.60x10 <sup>-1</sup>	.75x10 <sup>-1</sup>	.92x10 <sup>-1</sup>	.13	.16	.29	.55
3.000	.46x10 <sup>-1</sup>	.81x10 <sup>-1</sup>	.10	.12	.18	.22	.37	.74
4.000	.73x10 <sup>-1</sup>	.13	.17	.20	.28	.36	.64	1.25
5.000	.11	.19	.25	.29	.41	.54	.96	1.80
6.000	.15	.26	.34	.40	.56	.72	1.30	2.50
7.000	.20	.35	.44	.52	.72	.96	1.70	3.30
8.000	.25	.44	.55	.66	.92	1.20	1.10	4.0
9.000	.31	.54	.68	.82	1.24	1.48	1.60	5.1
10.000	.38	.64	.82	1.00	1.40	1.80	3.5	6.2
11.000	.46	.76	.98	1.20	1.70	2.25	4.0	7.7
12.000	.55	.91	1.15	1.45	2.05	2.5	4.9	9.5
13.000	.64	1.07	1.37	1.70	2.5	3.3	5.9	11.3
14.000	.74	1.25	1.60	2.00	2.90	3.9	7.1	13.0
15.000	.86	1.47	1.90	2.35	3.40	4.6	8.5	15.0
Inducción	frecuencia (hertz)							
Gauss	400	1000	1600	2500	4000	6400	10000	15000
10	0.14x10 <sup>-4</sup>	0.56x10 <sup>-4</sup>	0.13x10 <sup>-3</sup>	0.39x10 <sup>-3</sup>	0.79x10 <sup>-3</sup>	0.16x10 <sup>-2</sup>	0.38x10 <sup>-2</sup>	0.80x10 <sup>-2</sup>
16	.47x10 <sup>-4</sup>	.20x10 <sup>-3</sup>	.43x10 <sup>-3</sup>	.10x10 <sup>-3</sup>	.24x10 <sup>-2</sup>	.56x10 <sup>-2</sup>	0.11x10 <sup>-1</sup>	.30x10 <sup>-1</sup>
85	.14x10 <sup>-3</sup>	.58x10 <sup>-3</sup>	.14x10 <sup>-3</sup>	.32x10 <sup>-2</sup>	.80x10 <sup>-2</sup>	.19x10 <sup>-1</sup>	0.44x10 <sup>-1</sup>	.10
40	.40x10 <sup>-3</sup>	.18x10 <sup>-2</sup>	.44x10 <sup>-2</sup>	.95x10 <sup>-2</sup>	.24x10 <sup>-1</sup>	.58x10 <sup>-1</sup>	.14	.31
64	.11x10 <sup>-2</sup>	.51x10 <sup>-2</sup>	.11x10 <sup>-1</sup>	.27x10 <sup>-1</sup>	.64x10 <sup>-1</sup>	.15	.38	.84
100	.20x10 <sup>-2</sup>	.13x10 <sup>-1</sup>	.29x10 <sup>-1</sup>	.67x10 <sup>-1</sup>	.15	.38	.96	8.0
160	.70x10 <sup>-2</sup>	.32x10 <sup>-1</sup>	.70x10 <sup>-1</sup>	.16	.38	.95	2.3	5.0
250	.17x10 <sup>-1</sup>	.74x10 <sup>-1</sup>	.17	.38	.93	2.2	5.3	22.0
400	.41x10 <sup>-1</sup>	.18	.39	.93	2.2	5.2	15.0	87.0
640	.95x10 <sup>-1</sup>	.42	.90	2.2	5.1	13.0	30.0	62.0
1.000	.22	.94	2.2	5.1	12.0	29.0	72.0	
1.600	.48	2.15	4.9	12.0	28.0	65.0		
2.000	.71	3.2	7.4	28.0	42.0			
2.500	1.10	4.6	11.0	42.0	65.0			
3.000	1.40	6.4	15.0	63.0				
4.000	2.30	11.0	26.0					
5.000	3.50	16.0	38.0					
6.000	5.0	22.0	50.0					
7.000	6.6	29.0	65.0					
8.000	9.5	37.0						
9.000	10.9	46.0						
10.000	13.4	58.0						
11.000	16.0							
12.000	19.0							
13.000	23.0							
14.000	25.0							
15.000	29.0							

Tabla 2-4. Factores de corrección para obtener las perdidas a distintas frecuencias e inducción, partiendo de 10000G y 60Hz.

### 2.1.3 Descripción y clasificación de los materiales magnéticos

Los tres materiales magnéticos más característicos son: el hierro, el níquel y el cobalto, cuyas propiedades magnéticas más importantes se consignan en la Tabla 2-5.-

De los tres elementos, el hierro es el más barato, abundante, y de mejores propiedades magnéticas, sobre todo cuando está purificado (en ensayos de laboratorio se ha llegado a obtener probetas con permeabilidad inicial de 30.000 y permeabilidad máxima de 250.000).-

Generalmente no se lo utiliza solo, debido por una parte, al relativamente alto costo de purificación, y por otra, al mejoramiento de determinadas propiedades magnéticas que se obtienen aleándolo con otros materiales.-

	$B_{\text{máx}}$ (Gauss)	Campo coercitivo (Oersted)	Permeabilidad máxima	Punto de Curie °C
Hierro	21.580	0.9	5.000	770
Níquel	6.084	0.7	2.500	358
Cobalto	17.900	10.0	250	1.121

**Tabla 2-5 Valores de referencia.**

En níquel es, de los tres, el que tiene propiedades magnéticas menos pronunciadas, por lo que el metal puro, por si mismo, no se utiliza como material magnético, excepto en casos especiales como por ejemplo para transductores, por su relativamente alta magnetoestricción.-

El cobalto es el más caro, por lo que como metal puro tampoco se lo utiliza, pero como elemento de aleación, su uso es cada vez más generalizado; su elevado punto de Curie lo hace indispensable en materiales para trabajar a elevadas temperaturas.-

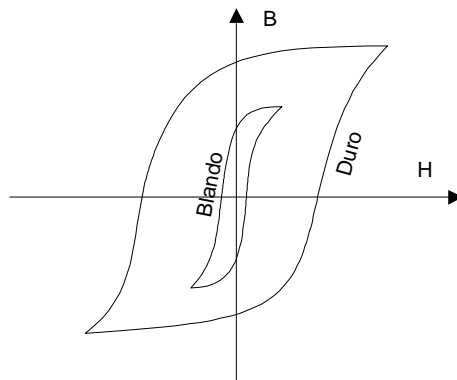
Los materiales magnéticos (ferromagnéticos) se usan, principalmente para dos finalidades:

- 1) Orientar y confinar el flujo producido por una corriente (núcleo de transformadores, inductores, etc.)
- 2) Crear flujo sin circulación de corriente (imanes permanentes).

Generalmente los materiales magnéticos suelen dividirse en dos categorías: blandos y duros.-

Los primeros se caracterizan por una alta permeabilidad, bajo campo coercitivo y pequeña pérdida por histéresis; se utilizan fundamentalmente para orientar y confinar flujos producidos por circulación de corrientes.-

Los segundos se caracterizan por el alto campo coercitivo y se utilizan fundamentalmente como imanes permanentes.-



**Figura 2-6. Curvas de materiales magnéticos de distinta dureza.**

Los materiales magnéticos blandos se procesan para lograr máxima permeabilidad y pequeñas pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Los defectos estructurales pueden aumentar la fuerza coercitiva y la histéresis, por la fijación de las paredes de los dominios.-

La estructura cristalina de un material magnético es de capital importancia para algunas de sus características, como la permeabilidad y el área del ciclo de histéresis.-

La regularidad del retículo cristalino, puede ser alterado por deformaciones a que se haya sometido el material durante la elaboración, o por la presencia de impurezas.-

Las impurezas pueden ser intersticiales o de sustitución; los átomos de oxígeno y de carbono, constituyen el primer tipo de impurezas, introduciéndose entre los átomos del retículo, mientras otras impurezas cuyos átomos son de magnitud distinta a los de hierro, sustituyen a éstos, alterando la regularidad del retículo. Una permeabilidad elevada y bajas pérdidas por histéresis, van asociadas a la falta de tensiones internas en el material, para un retículo cristalino regular y granular.-

Las impurezas en pequeñas cantidades aumentan enormemente las pérdidas magnéticas. Si las impurezas existen en proporción elevada, se tiene el fenómeno del envejecimiento del material magnético, es decir, tiene lugar en

éste un enorme aumento de las pérdidas después de un cierto tiempo de funcionamiento.-

Los materiales magnéticos blandos se dividen en: materiales para campos magnéticos continuos, y materiales para campos magnéticos alternos.-

### **2.1.3.1 Materiales para campos magnéticos continuos**

- **Hierro puro**

A esta clase de material pertenece el hierro muy pobre en carbón, que ha sido refinado sin la adición de otros metales, es decir, no se ha formado ninguna aleación del hierro con otros metales.

Para los circuitos magnéticos a flujo constante, las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas, son de escasa importancia; en estos casos las características esenciales son: una gran permeabilidad y una elevada inducción de saturación. En el comercio existen varias calidades de hierro puro, llamados comúnmente hierro dulce, entre ellas pueden mencionarse.

- El hierro electrolítico.
- El hierro sueco, obtenido mediante la fusión de minerales muy puros, con carbón de madera.
- El hierro Armco, obtenido por la depuración del hierro sueco con el horno Siemens-Martin.

El refinado del hierro dulce por medio de la electrólisis, se obtiene en una cuba que contiene una solución de cloruro o sulfato ferroso. El cátodo es de plomo o cobre, y el ánodo está constituido por un lingote de hierro dulce.

El baño se mantiene a 60°C, y se agita continuamente. La densidad de corriente es de 10Amp/dm<sup>2</sup>. El material depositado queda poco adherido sobre el cátodo y puede separarse fácilmente. Luego se somete a un recocido para eliminar los gases que han quedado ocluidos.

Este hierro no alcanza la pureza del hierro Armco.

El refinado del hierro puede alcanzar un grado notable en el horno Siemens-Martin. La temperatura supera los 1700°C, y el revestimiento del horno es básico. El hierro dulce introducido se mezcla con una notable cantidad de cal para eliminar todas las trazas de fósforo.

El material obtenido tiene un contenido de hierro superior al 99,9%.

La permeabilidad máxima del hierro Armco es de 7.000, la del hierro sueco de 5.500. La resistividad del hierro puro es pequeña  $\rho=10\mu\cdot\Omega/\text{cm}$ .

El hierro dulce se encuentra en el comercio en forma de laminados o barras redondas, para la construcción de circuitos magnéticos, de altavoces electrodinámicos y magnetodinámicos, de relés, de expansiones polares para aparatos de medida, etc..

### **2.1.3.2 Materiales para campos magnéticos alternos**

- **Aleaciones de hierro.**

El empleo limitado del hierro puro en la construcción eléctrica en general, no sólo es debido a su costo relativamente elevado, sino también a las notables pérdidas por efecto de las corrientes parásitas, que se manifiestan en dicho material cuando es sometido a la acción de campos magnéticos variables. Su resistividad es relativamente pequeña, por lo que reducidas tensiones inducidas en piezas magnéticas de hierro dulce, provocan corrientes de notable intensidad.

El aumento de la resistividad del hierro, se obtiene mediante la aleación de éste con otros metales. Las aleaciones más importantes son las siguientes: hierro-silicio, hierro-níquel, hierro-cobalto, de las cuales sólo las dos primeras tienen un amplio empleo en los campos magnéticos alternos.

Además se vuelve a destacar que, con campos magnéticos alternos, el material se usa laminado.

- **Aleaciones de hierro-silicio**

En los estudios realizados para determinar las causas de las notables

pérdidas observadas en las primeras máquinas eléctricas, se determinó que la presencia de oxígeno y el carbono en el hierro, constituía el factor principal de dichas pérdidas.

Con la adición de elementos como el aluminio y el silicio, que tiene una elevada afinidad con el oxígeno, se consiguió una mejora substancial.

El silicio reacciona químicamente con los óxidos, formando silicatos, que se separan de la masa bajo la forma de escoria, y hace precipitar el carbono en forma de grafito, que también se elimina con la escoria, impidiéndole formar cementita dispersa en el retículo cristalino.

A la fundición o al hierro en lingotes se le añade, en un crisol, aleación de hierro-silicio. Con una alta proporción de este último, el metal fundido es colado en lingotes, que pasan por la laminadora hasta obtener las planchas de espesor deseado. Espesores corrientes en el comercio son 0,5 y 0,35mm, pero existen también planchas de 0,15mm. La máxima proporción de silicio en la plancha magnética, es de 4,5%. Generalmente es de 3,5 a 4%, pero existen láminas que contienen el 0,2%.

Aparte de los recocidos necesarios durante la laminación caliente, las planchas de hierro-silicio sufren un recocido final a 800°C.

Se ha observado que con la laminación en frío se obtiene una orientación de los cristales en la aleación, lo que hace que aumente la permeabilidad en la dirección del laminado.

Se ha desarrollado así una técnica especial de laminado en frío y producción de planchas, conocida con el nombre de **plancha de grano orientado**. Del lingote se obtienen en caliente, láminas que son en frío, reducidas en un 60% de su espesor.

Una vez recocidas y echas enfriar, son laminadas hasta una nueva reducción del 60%, y así sucesivamente hasta el espesor deseado. Se someten las planchas a un último recocido a temperaturas elevadas para reducir la recristalización y el crecimiento de los granos orientados. El hierro-silicio debería ser recocido a 700 u 800°C, en atmósfera inerte, y enfriados lentamente después de ser sometido al corte para recuperar sus cualidades magnéticas, pero dicha práctica no se observa casi nunca.

Entre los inconvenientes que presentan las planchas de hierro-silicio están, un menor coeficiente de conductibilidad térmica respecto al hierro puro, particularidad que no interesa mucho en el caso de pequeños transformadores, y un aumento notable de la dureza y la fragilidad. Al aumentar el tanto por ciento de silicio, una plancha delgada requiere el empleo de aceros especiales en la construcción de las cizallas y matrices.

Planchas delgadas de hierro-silicio, con un 4% de  $\text{Si}_2$ , de 0,35mm, si se hacen trabajar con una inducción  $B=1\text{Wb/m}^2$ , presentan 1,3W/Kg de pérdida totales. Estas pérdidas aumentan a 3,5W/Kg a 2.000Hz; a 14W/Kg. a 5.000Hz y a 45W/Kg. a 10.000Hz. Planchas delgadas de hierro silicio de grano orientado, al 3% de silicio, trabajando con una inducción de  $B=1,2\text{Wb/m}^2$ , presentan una pérdida de 0,5W/Kg a 50Hz. Cuando en un determinado tipo de plancha al silicio se indican las pérdidas en W/Kg, se sobreentiende que dicho valor se refiere a una inducción de  $1\text{Wb/m}^2$ , y a la frecuencia de 50Hz.

- **Aleación de hierro-níquel.**

Las aleaciones de hierro-níquel tienen una enorme importancia en los equipos electrónicos, para algunos de cuyos componentes se requieren aleaciones con elevada permeabilidad, y escasa pérdida por histéresis para inducciones de pequeño valor.

Las aleaciones de hierro-níquel son mucho menos frágiles que las de hierro-silicio, y pueden reducirse a láminas delgadas. El tanto por ciento de níquel contenido en estas aleaciones está comprendido entre el 35 y el 80%. Presentan el inconveniente de la saturación con baja densidad de flujo, aparte del costo elevado.

Son producidas fundiendo los metales puros en un horno eléctrico con

atmósfera de hidrógeno o en vacío.

Se cueban en lingotes que son mecanizados para eliminar las impurezas y escorias, antes de pasar a las laminadoras, cuya atmósfera no debe contaminarlos.

Las aleaciones con un 60 a 80% de níquel, suelen ser de grano orientado para obtener la máxima permeabilidad; es decir, que suelen ser anisótropas<sup>33</sup>, y esta anisotropía se puede lograr, ya sea por medio de una orientación magnética durante el enfriamiento del material (mientras pasa por el punto Curie), o mecánicamente, con un laminado adecuado, como en el caso del hierro-silicio.

Para algunos tipos de núcleo, se emplean aleaciones de hierro-níquel en polvo. La adición de níquel al hierro produce una aleación de elevada resistividad, y las pérdidas por corrientes parásitas resultan notablemente reducidas.

Las aleaciones de hierro-níquel son muy empleadas bajo la forma de planchas delgadas cortadas y tratadas; o bien como núcleos pulverizados. Los productos comerciales pueden dividirse en tres categorías, según el tanto por ciento de níquel, de 75% a 80 %; de 50% y de 30%.

A la primera categoría pertenecen el **Permalloy C** y el **Mumetal**.

Se pueden obtener valores más elevados de la permeabilidad, añadiendo a estas aleaciones binarias, otros elementos como el molibdeno, o controlando la proporción de impurezas, y sometiénolas a tratamientos térmicos especiales: **supermalloy**.

Sus principales características son:

- permeabilidad muy elevada
- saturación con escasa **f.m.m.**
- bajas pérdidas por histéresis y corrientes parásitas
- resistividad alta
- costo muy elevado

Se utilizan en: transformadores de banda ancha, pupinización, relés rápidos, áncoras para pick-up, pantallas magnéticas, transformadores de medidas y piezas magnéticas para instrumentos de hierro móvil.

A la segunda categoría (50% de níquel) pertenecen el **Permalloy B**, el **Radiometal** y el **Hipernik**. El **Permenorm 5.000 Z** (de grano orientado), y el **HCR**; se suministran bajo la forma de núcleos toroidales y arrollados en espiral.

Sus principales características son:

- permeabilidad muy elevada
- saturación con **f.m.m.** media
- reducidas pérdidas por histéresis y corrientes parásitas
- resistividad media
- costo muy elevado

Se utilizan en: transformadores intervalvulares, relés para corrientes débiles (continua y alterna), transformadores de salida, impedancias.

A la tercera clase pertenecen el **permalloy D** y el **Rhometal**, que presentan la máxima resistividad.

Sus principales características son:

- alta permeabilidad
- saturación con reducida **f.m.m.**
- bajas pérdidas por histéresis y corrientes parásitas
- resistividad media
- costo relativamente bajo

Se utilizan en: transformadores de alimentación y de salida de audio, impedancias de filtro, motores y generadores.

- **Núcleos magnéticos de polvo**

Para su empleo en audiofrecuencias elevadas o RF, puede adoptarse el hierro, si se reduce a polvo. Los gránulos resultan separados unos de otros por una finísima capa de material aislante, una vez que han sido

---

<sup>33</sup> Dícese de los cuerpos y objetos en los que las propiedades difieren según la dirección considerada

cuidadosamente amasados con este y prensados para obtener los núcleos de la forma deseada.

Para pulverizar el hierro se emplean varios métodos, entre los cuales figuran el electrolítico, el de reducción por medio de hidrógeno, o el de desintegración mecánica.

Ninguno de estos métodos ofrece la posibilidad de que las partículas alcancen dimensiones en torno a la micra. Presentan además el inconveniente de dar lugar a gránulos en forma irregular, que aunque sean debidamente recubiertos de una capa de material aislante, bajo la notable presión de que son objeto en el estampado, los núcleos perforan dicha capa y quedan en contacto entre sí.

El método electrolítico se basa en el empleo de un baño, a ser posible con sales alcalinas, en el cual se hace circular entre los electrodos, una corriente muy intensa por unidad de superficie de los mismos. El metal se deposita sobre el cátodo formando una superficie de estructura ramificada y ligera.

Se retira el cátodo a intervalos regulares, para evitar que la superficie de dichos electrodos se haga tan grande que resulte normal la densidad de corriente; es decir, adecuada para un depósito continuo. El metal depositado es fácilmente pulverizado por trituración.

El método de reducción del óxido de hierro a metal por medio de hidrógeno, se basa en pulverizar finamente el óxido, y calentarlo en atmósfera de hidrógeno.

El método de la pulverización mecánica del hierro se basa en partir de este metal en forma de hilo, y desmenuzarlo a la entrada de un molino rotativo, en el cual se hacen girar las partículas a gran velocidad, golpeándolas entre sí y pulverizándolas recíprocamente. Una corriente de gas inerte hace salir a las partículas que han adquirido dimensiones suficientemente pequeñas (método Hametag).

Las partículas obtenidas por cualquiera de los tres procedimientos descriptos son tamizadas o creadas. El hierro en polvo se emplea en la producción de núcleos, en los que es más importante obtener un valor elevado de permeabilidad (150 a 200), que un alto coeficiente de mérito  $Q$  de la bobina. El polvo de hierro se mezcla criteriosamente con una resina sintética disuelta en un disolvente (baquelita en alcohol, poliestireno en benzol), que luego se pasa al prensado de los núcleos por medio de los procedimientos corrientes.

Para las bobinas de RF se emplea exclusivamente un hierro en polvo obtenido por otro procedimiento, el de la descomposición del hierro carbonilo. Mediante la reducción del óxido de hierro con hidrógeno se obtiene un polvo de hierro esponjoso éste se hace reaccionar con monóxido de carbono, y se obtiene el hierro pentacarbonilo, líquido estable por debajo de los  $100^{\circ}\text{C}$ , este líquido es atomizado en un recipiente calentado al rojo, haciéndolo pasar en forma de gotas, bajo una fuerte presión, a través de unos agujeros pequeñísimos. En contacto con las paredes del recipiente, y en atmósfera inerte, las gotitas se transforman en esferas microscópicas de hierro puro de algunas micras de diámetro, que se recogen en el fondo.

Las pérdidas por histéresis de los núcleos producidos con este material son muy reducidas, a pesar del contenido de carbono y nitrógeno. Si se procede a una purificación y recocidos sucesivos, la permeabilidad y las pérdidas aumentan. La permeabilidad de los núcleos es relativamente baja aunque el polvo, después de haberse mezclado con el aislante disuelto, se haya sometido a presiones notables (de 3 a  $15\text{tn/cm}^2$ ) durante el prensado.

La permeabilidad efectiva de los núcleos prensados con este polvo, viene definida por  $\mu_a = L/L_0$  ( $\mu_a = \mu$  aparente), siendo  $L$  la inductancia de la bobina con el núcleo introducido y centrado respecto al arrollamiento, y  $L_0$  la inductancia sin el núcleo.

- **Ferritas**

La búsqueda de materiales magnéticos de alta resistividad se canalizó hacia sustancias no metálicas, tales como ciertos óxidos de hierro o

ferritas.

Estos materiales, siendo compuestos químicos, tienen electrones que son ligados por fuerzas de valencia, y por ello su conductividad es baja, vale decir que su resistividad es alta y como consecuencia, las pérdidas por corriente de Foucault resultan bajas.

Las ferritas son compuestos químicos de fórmula general  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{MO}$ , donde M representa un metal bivalente que puede ser Cu, Mg, Ni, Fe o Zn. Se preparan mezclando íntimamente en correctas proporciones los óxidos constituyentes, de elevada pureza y finamente divididos. Estos se sintetizan bajo presión, y unos  $200^\circ\text{C}$  durante aproximadamente dos horas; luego se los muele, y comprimiéndolos a la forma deseada a unas  $4\text{tn/cm}^3$ , se los calienta nuevamente a unos  $1200$  o  $1300^\circ\text{C}$  en atmósfera controlada.

La primera vez que se observó el ferromagnetismo en una sustancia no metálica, fue en la magnetita  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{FeO}$ . En este material que se conoce como ferrita ferrosa, hay unión bivalente o ferroso por cada dos iones trivalentes o férricos. Esto se puede expresar como:  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4^{2-}$ .

La resistividad de este material es de aproximadamente  $10^{-2}\text{ohm/cm}$ , que si bien es  $10^3$  veces mayor que la del hierro puro, resulta todavía muy baja si se pretende reducir sustancialmente las pérdidas por corriente de Foucault.

Si los iones ferrosos se reemplazan por uno de los iones bivalentes antes mencionados, el material resultante presenta una resistividad que va de  $10^2$  a  $10^6\text{ohm/cm}$ , la que presenta una mejora entre  $10^6$  y  $10^{12}$  veces con respecto a los materiales ferromagnéticos metálicos convencionales.

Además, para obtener alta permeabilidad inicial y bajas pérdidas por histéresis es esencial la ausencia de tensiones en la estructura del material. Esto se logra tan solo en una estructura cristalina cúbica, donde la contracción durante el enfriamiento es igual en todas direcciones; condición ésta de suma importancia, ya que en el proceso de fabricación, estos materiales son sintetizados a temperaturas entre  $1.000$  y  $1.400^\circ\text{C}$ .

Las ferritas son materiales cerámicos duros, no porosos, de color gris oscuro, inalterables frente a los agentes atmosféricos y químicamente inertes con propiedades mecánicas similares a las cerámicas aislantes comunes. Si bien no es fácil que se quiebre, debe manejarse con cuidado para evitar las cascaduras, sobre todo en los cantos vivos.

Las ferritas no pueden ser maquinadas con herramientas cortantes, y si fuera necesario modificar alguna de sus dimensiones, por ejemplo, para obtener un mayor entrehierro, puede realizarse, rectificando la pieza por medio de abrasivos tal como se procede con las cerámicas duras.

En el caso que se quiere cortar una pieza, por ejemplo una varilla para antena, se procederá como se acostumbra con el vidrio, es decir, se marcará el corte con un diamante, un metal duro, o un disco con carborúndum, y luego se corta aplicando una fuerza normal al eje, como se haría con una barra de vidrio.

Empleando núcleos de ferritas con bobinas de RF en sustitución del hierro carbonilo, se obtiene un aumento del  $Q$ , que puede ser del 100% o incluso mayor, o bien, manteniendo el valor de  $Q$  constante, se puede conseguir una notable reducción en las dimensiones de las bobinas.

Los materiales **Ferroxcube** de la firma Philips, comprende una serie A de cuatro clases de ferrita, manganeso-zinc, y una serie B de cinco clases de ferrita níquel-zinc. La casa Krupp Widi produce una serie similar de materiales para alta frecuencia.

Las ferritas ternarias con manganeso y magnesio presentan un ciclo de histéresis rectangular, y se emplean en los amplificadores magnéticos y en las calculadoras electrónicas.

### **2.1.3.3 Materiales para imanes permanentes**

El hecho de que los materiales destinados a ser utilizados como imanes permanentes se encuentran sometidos a su propio campo desimantador, y a la

acción eventual de causas externas desmagnetizadoras, hace que para que estos materiales puedan ser utilizados como tales, deban presentar una fuerte resistencia a la desmagnetización, es decir, altos campos coercitivos. Para lograr esto la teoría indica que es necesario que en el material se hallen presentes tensiones internas tan grandes como sea posible, e irregularmente distribuidas, al mismo tiempo que macroinclusiones, ocupando un gran espacio relativo.

Este endurecimiento magnético, que se produce a causas de ciertos factores que no siempre provocan al mismo tiempo endurecimiento mecánico, se consigue en líneas generales, mediante los siguientes procedimientos:

- A) Aceros mantensíticos o endurecidos por temple.
- B) Aleaciones endurecidas por dispersión.
- C) Aleaciones endurecidas por deformación.
- D) Aleaciones endurecidas mediante la formación de super-redes.

#### • Aleaciones de hierro

La magnetita natural constituía el material magnético con el que se fabricaban las brújulas en la edad media.

El material magnético empleado hasta 1910 era el acero (1 a 1,5% de carbono) templado, cuyos parámetros estaban bastante sujetos a los golpes y a las variaciones de temperaturas.

Resultados mejores se obtuvieron mediante la producción de aceros al tungsteno y al cromo, aceros para herramientas; los que posean 0,5 a 1% de carbono, y de 5 a 6% de tungsteno, dieron lugar a los mejores imanes. La energía máxima que se podía obtener, era de unos 2.500Joules/m<sup>3</sup>, contra unos 2.000 en el acero corriente.

Aumentando en el acero el tanto por ciento de cobalto del 2 al 35% se obtiene un aumento de la energía máxima, hasta 75.000Joules/m<sup>3</sup>.

Todos los aceros descriptos hasta ahora deben sufrir un temple en aceite o aire, después de haberlos calentado hasta unos 950°C.

Se tiene con esto la precipitación de carburo de hierro, que provoca tensiones internas en el retículo cristalino. Se cumple así las condiciones de máxima dureza y estabilidad del material, pero esta estabilidad es relativa, pues la magnetización disminuye con choques repetidos.

Desde 1934 se han ido difundiendo las aleaciones de hierro con aluminio y níquel, conteniendo algunas de ellas, cobalto. Estas aleaciones poseen tensiones internas producidas por la dispersión parcial de los átomos de hierro en la aleación, obtenida mediante un temple adecuado, con un subsiguiente revenido.

Estas aleaciones denominadas **Alni** y **Alnico**, según los metales que acompañan al hierro, tienen una energía alta, **B•H**=10.000 a 17.000.

Un ulterior aumento de la energía disponible, se consigue dejando enfriar la aleación, desde 800°C, en un campo magnético intenso, con lo que se obtiene aleaciones anisótropas, como el **Alcomax** y el **Ticonal**, en las cuales el valor de **B•H** llega a ser de 50.000 en la dirección en que se ha aplicado el campo durante el temple, mientras las características resultan más escasas en la dirección normal.

Las aleaciones de aluminio-níquel y derivadas, se producen fundiendo a 1.600°C los distintos componentes, muy puros, y colando la masa en los moldes. El horno debe poseer atmósfera no oxidante. Dada la extremada dureza de estas aleaciones sólo es posible rectificar las caras que están en contacto con las expansiones polares.

No es posible efectuar agujeros pequeños ni roscar, se pueden obtener agujeros grandes en la fusión, que luego se rellenan con el material fácilmente fusible, que después es taladrado y roscado.

Generalmente los agujeros son sustituidos por hendiduras, en las que se alojan los tornillos de sujeción o fijación a las expansiones polares. A veces el imán queda aprisionado en la masa del metal, de bajo punto de fusión. Es posible soldar por medio de una soldadura fuerte, los imanes a las expansiones de hierro dulce, con tal que no se eleve demasiado la temperatura. En las soldaduras dulces, se



procede a un cobreado previo a las piezas a soldar.

Generalmente la fijación de los imanes a los soportes de los altavoces se obtiene por medio de colas basadas en resinas sintéticas.

Por la compleja forma de obtención de los imanes, que no pueden obtenerse fácilmente por fusión, se recurre a la sintetización de las mencionadas aleaciones, este proceso resulta conveniente para obtener imanes cuyo peso sea de unos 50gr o inferior.

Los distintos metales, pulverizados, se comprimen en la prensa, calentándolos a unos  $1.300^{\circ}\text{C}$ . Las partículas se difunden una de las otras, y se pueden obtener densidades similares a las de las aleaciones fundidas, pero las propiedades magnéticas resultan un poco más reducidas.

En algunos casos, se emplea el hierro y el aluminio en polvo, a los que se le agregan los otros metales pulverizados que deben constituir la aleación, debido a las dificultades que existen para la oxidación del aluminio.

Los imanes pueden enfriarse en un campo magnético para pasar a la forma anisótropa.

Existen otras aleaciones magnéticas de características especiales. El **Vicalloy** (hierro, cobalto, vanadio) de la firma Bell Tel. Lab. tienen características similares al acero al 35% de cobalto. Puede ser mecanizado y laminado, características medias son:  $\mathbf{B \cdot H} = 10.000$ ,  $\mathbf{B_r} = 1$ . Se puede llegar a un valor de  $\mathbf{B \cdot H} = 35.000$  con un mecanizado en frío, pero el material resulta durísimo.

Aleaciones endurecidas por precipitación mediante un proceso de temple, son: El **Cunico**, y el **Cunife**, de la firma General Electric ( $\mathbf{B \cdot H} = 7.000$  y  $15.000$  y fuerza coercitiva  $\mathbf{H_c} = 57.000$  y  $47.000$  respectivamente).

- **Ferritas para imanes permanentes**

Se puede producir imanes por medio de óxido de hierro y cobalto, en polvo, sintetizados a  $1000^{\circ}\text{C}$ , enfriados en un campo magnético intenso. Se obtienen valores de  $\mathbf{B \cdot H} = 15.000$  (**Vectolite**).

Ferritas al bario son producidas por la casa Philips con el nombre de **Ferroxdure** (denominada **Magnadur** por la Mullard, Gecolite, Ceramag). Su  $\mathbf{B \cdot H}$  tiene un valor doble al correspondiente a los imanes sintetizados con óxidos de hierro y cobalto. Los óxidos pulverizados se comprimen en presencia de un campo magnético, y los imanes se dejan enfriar en un campo magnético. Estas ferritas se distinguen por su valor muy elevado de la fuerza coercitiva  $\mathbf{H_c} = 170.000$  por lo que son insustituibles en los casos en que existen campos desmagnetizantes intensos. Poseen, por otra parte, una resistividad muy elevada, superior a los  $107\Omega/\text{cm}$ .

#### **2.1.3.4 Cintas magnéticas**

La cinta magnéticas empleadas en el magnetófono está constituidas por una fina cinta que puede ser acetato de celulosa, tereftalato de polietileno (**Mylar**) o cloruro de polivinilo (**P.V.C.**; **Nylon**), sobre una de cuyas caras se ha depositado una capa de barniz que contiene óxido de hierro.-

El óxido de hierro rojo,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , existe en dos forma, de las cuales la forma  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tiene propiedades magnéticas. Este óxido férrico magnético puede cristalizar en el sistema cúbico o regular; esta es la forma más adecuada para la fabricación de cintas magnéticas, con la adición de que la orientación sea en el mismo sentido de deslizamiento de la cinta. Esta orientación se obtiene por medio de un campo magnético, el cual se somete tan pronto como se ha depositado la capa de barniz, estando éste todavía líquido. La cantidad de óxido de hierro es aproximadamente el 70% respecto a la masa total de sustancia seca; esta proporción no puede ser aumentada porque se tendría una dificultad en la aplicación del barniz, ni disminuida, pues en este caso habría una disminución en la intensidad de grabación.-

Las cintas producidas son controladas continuamente en lo que se refiere a sus propiedades magnéticas, como elevada fuerza coercitiva, mínimo rumor debido a la granulosidad de las partículas de hierro, mínimo efecto de

impresión (paso de registro de una capa sobre las adyacentes en la bobina), sensibilidad uniforme (por ejemplo uniforme de la capa de barniz).-

Interesan asimismo muchas características mecánicas, como la adherencia del barniz al soporte, la resistencia al uso, la flexibilidad, la mínima tendencia a la producción de cargas estáticas sobre la superficie del soporte, etc..-

La cinta de celulosa tiene el inconveniente del estiramiento, pero en caso de rotura su corte es neto y sin deformación.-

En las de tereftalato de polietileno (**Mylar**) el corte es con deformación plástica.-

Los espesores están comprendido entre 0,02 y 0,04mm.-

## 2.2 Circuito Magnético

Cuando se desea tener un flujo magnético en una determinada región, se utiliza, en la práctica, una estructura de material magnético, y el problema suele ser calcular la intensidad del campo magnético  $\mathbf{H}$ , y la inducción  $\mathbf{B}$ , en los distintos puntos de dicha estructura; la solución exacta de este problema es sumamente difícil, y exige, entre otras cosas, que se satisfagan simultáneamente las siguientes condiciones

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\ell = N \cdot I$$

$$\int_{\mathbf{x}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

Sin embargo en muchos casos, ciertas suposiciones simplificativas, permiten soluciones mucho más sencillas.

Estas suposiciones son:

1. Que las líneas de  $\mathbf{B}$  son paralelas a la superficie que limitan el medio magnético y están confinadas en el interior del material (esto es aproximadamente cierto si la substancia empleada tiene un  $\mu$  elevado; lo que ocurre en los materiales magnéticos).
2. Que los valores de  $\mathbf{H}$  y de  $\mathbf{B}$  en toda una sección transversal del circuito, pueden reemplazarse por valores medios. Esto implica la fijación de una longitud media del circuito.

Estas simplificaciones permiten tratar al campo magnético como un circuito llamado **circuito magnético**.-

Si en un circuito magnético se toma la integral curvilínea a lo largo de todo el circuito, se tiene:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\ell = H_1 \cdot \ell_1 + H_2 \cdot \ell_2 + H_3 \cdot \ell_3 + \dots + H_n \cdot \ell_n = N \cdot I$$

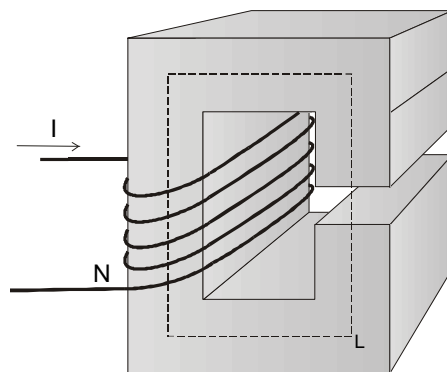


Figura 2-7. Circuito magnético.

En esta expresión se ha dividido la integral en varias partes, cada una de las cuales corresponde a una porción de sección constante, y  $\mu$  también constante.-

$\mathbf{H}$  es en todas partes paralela al camino de integración escogido.

Por otra parte, siendo las líneas de  $\mathbf{B}$  continuas a lo largo de todo el circuito, el flujo que atraviesa cualquier sección transversal del circuito es el mismo, y puede escribirse, en cualquier porción como:

$$\Phi = B \cdot S = \mu H \cdot S$$

en las que  $\mu$  y  $S$  son las correspondientes a esa porción, se tiene así que:

$$H_1 = \frac{\Phi}{\mu_1 \cdot S_1}; \quad H_2 = \frac{\Phi}{\mu_2 \cdot S_2}; \quad H_3 = \frac{\Phi}{\mu_3 \cdot S_3}; \dots$$

valores que substituidos en la expresión de la integral curvilínea dan:

$$N \cdot I = \Phi \cdot \left( \frac{\ell_1}{\mu_1 \cdot S_1} + \frac{\ell_2}{\mu_2 \cdot S_2} + \frac{\ell_3}{\mu_3 \cdot S_3} + \dots \right)$$

comparando esta expresión con la de un circuito eléctrico serie:

$$V = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + \dots) = I \cdot \left( \frac{\ell_1}{s_1 \cdot S_1} + \frac{\ell_2}{s_2 \cdot S_2} + \frac{\ell_3}{s_3 \cdot S_3} + \dots \right)$$

se ve que los términos  $1/(\mu \cdot S)$  son de la misma forma que los términos que expresan la resistencia eléctrica y se combinan en serie y en paralelo también de la misma forma. Estos términos se denominan **reluctancia magnética**  $R$  y al término  $N \cdot I$ , se le llama **fuerza magnetomotriz (f.m.m.)**, y la expresión puede escribirse como:

$$\text{f.m.m.} = \Phi \cdot R$$

expresión análoga a la de la ley de Ohm:

$$\text{f.e.m.} = i \cdot R$$

La recíproca de la reluctancia es la permeancia:  $P = 1/R$ .

Los conceptos de permeabilidad, reluctancia y permeancia, son muy útiles para el razonamiento en cambio para el cálculo solamente son útiles cuando la relación entre  $B$  y  $H$  puede considerarse una función lineal, es decir cuando  $\mu$  sea constante.

Cuando la permeabilidad  $\mu$  no es constante, la reluctancia es una función no lineal del flujo.

Planteada la analogía entre los circuitos eléctricos y magnéticos, puede encararse la solución de los mismos con criterios similares. A continuación se realizarán algunos circuitos eléctricos para pasar luego a los circuitos magnéticos.

### 2.2.1 Circuitos eléctricos

Las magnitudes puestas en juego en los circuitos eléctricos, pueden vincularse por medio de ecuaciones gráficamente representables, y la solución de estos circuitos puede efectuarse analíticamente o gráficamente.

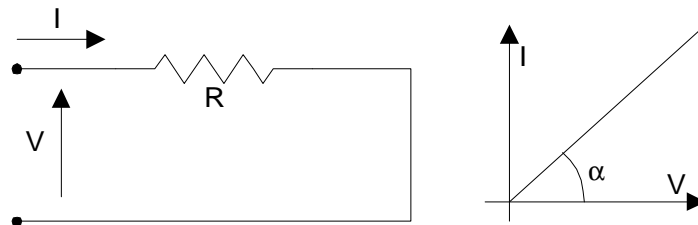


Figura 2-8

Por ejemplo, en el circuito más sencillos, compuesto de una sola resistencia (Figura 2-8):

$$V = i \cdot R$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{i}{V} = \frac{1}{R}$$

La relación entre los valores de  $V$  y de  $I$  pueden obtenerse de la ecuación o del gráfico. En este ejemplo la solución gráfica puede extenderse a circuitos más complejos.-

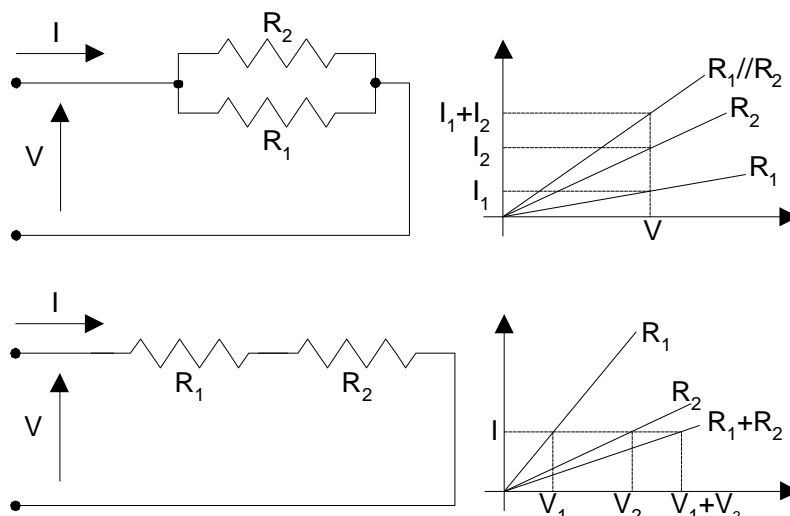


Figura 2-9

El último de los circuitos, es decir el compuesto por dos resistencias en serie, puede también solucionarse gráficamente (para un determinado valor de  $V_a$  de la tensión) de la siguiente manera:

En los circuitos lineales, este no es el normal procedimiento de solución, pues la solución analítica es más rápida y precisa, pero cuando se tienen elementos de comportamiento no lineal, y sobre todo cuando las variables vinculadas a los mismos no están ligadas por ecuaciones suficientemente sencillas, se resuelven en general, en forma gráfica.-

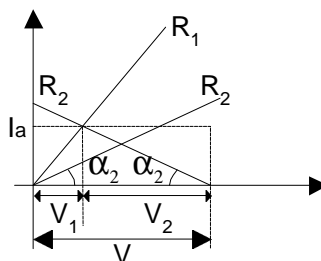


Figura 2-10. Método de resolución gráfica.

Por ejemplo: si se tienen dos lámparas de comportamiento no lineal conectadas en serie, a una tensión  $V_0$ , y se desea conocer la corriente  $I_0$  y las tensiones  $V_1$  y  $V_2$  sobre cada lámpara; el problema se lo soluciona en base a las curvas características tensión-corriente de cada lámpara, llevando en sentido inverso la curva de una de ellas, a partir de la tensión aplicada  $V_0$ .-

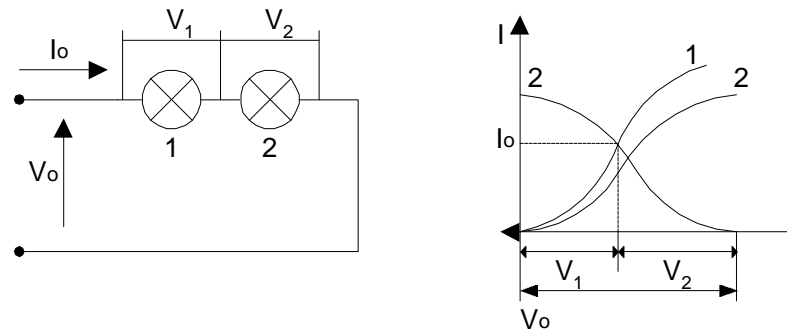


Figura 2-11. Circuito con elementos no lineales y resolución gráfica.

### 2.2.2 Circuitos magnéticos

Los circuitos magnéticos se asemejan en algunos aspectos a los circuitos eléctricos, y se resuelven, por lo general, en forma gráfica ya que las características  $\Phi$ -f.m.m., o  $B$ - $H$  son difíciles de expresar por ecuaciones suficientemente sencillas.-

El circuito magnético puede estar constituido de un solo material (un material magnético por ejemplo), y en este caso la solución es muy sencilla, pues el gráfico  $\Phi$ -f.m.m. puede dar directamente los valores correspondientes de  $\Phi$  y f.m.m..-

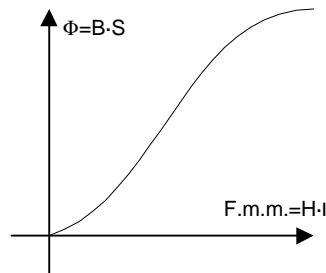


Figura 2-12. Dependencia entre  $\Phi$  y f.m.m.= $H \cdot l$ .

Si el circuito magnético no está compuesto por un solo material (Figura 2-13), interesa el comportamiento del conjunto. Un caso interesante es aquel en que el segundo material es aire (entrehierro), cuya curva de magnetización es una recta, ya que  $\mu$  es constante ( $\alpha'$ = pendiente de la recta).-

$$\text{tg } \alpha' = \frac{\Phi_{\text{aire}}}{\text{f.m.m.}_a} = \frac{1}{R_a} = \mu_a \cdot \frac{S_a}{\ell_a} = \text{cte}$$

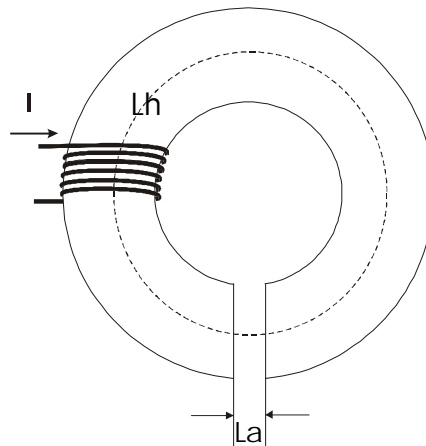


Figura 2-13. Circuito magnético con entrehierro.

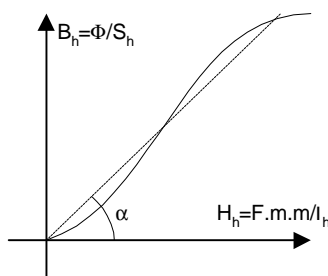
Pero los fabricantes de los materiales magnéticos dan las curvas **B-H** que son características de los materiales, no así las  $\Phi$ -**f.m.m.**, que dependen, en cada caso, del circuito magnético estudiado ( $S_a$ ,  $l_h$ ,  $N$ ,  $I$ ). Por esta razón conviene trabajar directamente con el gráfico **B-H**.

La pendiente de la recta del entrehierro en este gráfico será:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Phi_a / S_h}{f.m.m._a / l_h} = \frac{l_h}{S_h} \cdot \frac{\Phi_a}{f.m.m._a} = \frac{l_h}{S_h} \cdot \frac{1}{R_a} = \frac{l_h}{S_h} \cdot \frac{S_a}{l_a} = \operatorname{cte}$$

Cuando debido a las pequeñas dimensiones del entrehierro prácticamente no hay dispersión puede considerarse que  $S_h = S_a$ . En estas condiciones la ecuación se reduce a:

$$\operatorname{tg} \alpha = \mu_a \cdot \frac{l_h}{l_a}$$



**Figura 2-14. Curvas del entrehierro y material magnético superpuestas.**

Representar la recta del entrehierro junto con la curva del material magnético, es decir con abscisa  $H_h$ , equivale a considerar un campo ficticio en el aire, reducido a material magnético. Se comprende mejor observando que:

$$f.m.m._{total} = H_h \cdot l_h + H_a \cdot l_a = \left( H_h + H_a \cdot \frac{l_a}{l_h} \right) \cdot l_h$$

El paréntesis es el campo magnético total, que es igual al campo magnético en el material magnético, más un campo ficticio en el aire, cuya característica es tal que multiplicándolo por  $l_h$  da la parte de **f.m.m.** que corresponde al entrehierro. O sea:

$$H_a \cdot \frac{l_a}{l_h} = H' \text{ (campo ficticio del aire)}$$

**Ejemplo:** dado un circuito magnético compuesto de hierro y entrehierro del que se conoce:

- **f.m.m.** =  $N \cdot I$
- $S_h = S_a$
- $l_h$
- $l_a$
- curva **B-H**

se debe determinar:

- flujo resultante
- **f.m.m.**<sub>a</sub> (aire)
- **f.m.m.**<sub>h</sub> (hierro)

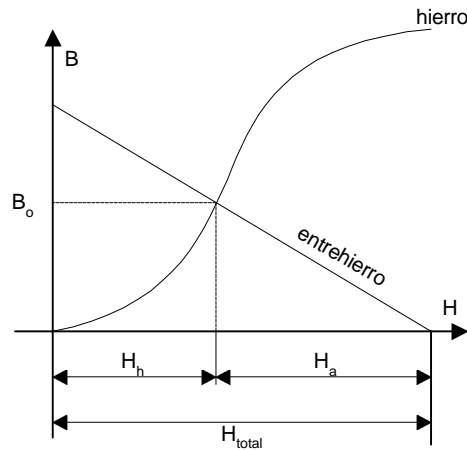


Figura 2-15. Recta de carga.

Solución:

$$H_{\text{total}} = \frac{N \cdot I}{\ell_h}$$

$$\alpha = \arctg \frac{\ell_h}{\ell_a}$$

Se traza la recta del entrehierro (Figura 2-15) y en la intersección con la curva del material magnético se tiene un punto, cuya ordenada  $B_0$  define el flujo total, y cuya abscisa define los valores de  $H_h$  y  $H_a$ .-

$$\oint B \cdot ds = B_0 \cdot S_h$$

$$f.m.m._{\text{hierro}} = H_h \cdot \ell_h$$

$$f.m.m._{\text{aire}} = H_a' \cdot \ell_h$$

Otra solución es sumar las curvas del hierro y entrehierro; se tiene la curva de magnetización total correspondiente al circuito magnético completo, curva que también permite resolver el problema.-

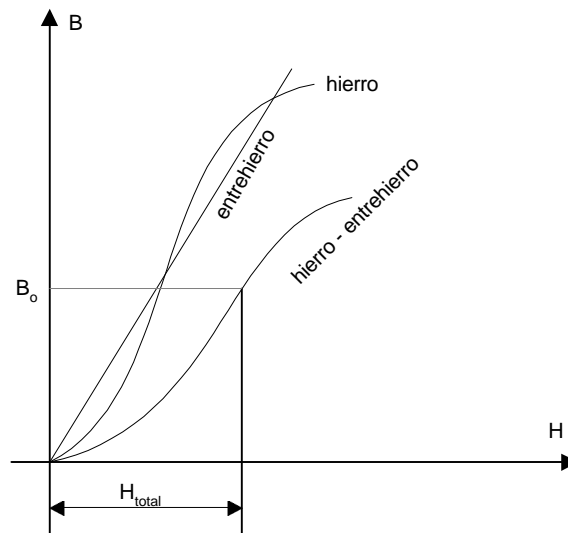


Figura 2-16. Curva resultante de B-H.

## 2.3 Núcleo de Inductores y transformadores

### 2.3.1 Laminaciones

Los materiales magnéticos utilizados en la construcción de inductores y transformadores, para baja frecuencia, (por ejemplo: Fe-Si) se presentan bajo la forma de laminaciones que generalmente tienen la forma de una E y una I (núcleos acorazados). Otros tipos de laminaciones son menos usadas en electrónica y se verán más adelante.-

El núcleo se forma agrupando un determinado número de laminaciones. El paquete de chapas debe tener un espesor tal, que la rama central (en la que se colocan los arrollamientos) tenga una sección aproximadamente cuadrada, pues a igualdad de superficie, la sección cuadrada tiene menos perímetro que la rectangular, lo que se traduce en arrollamientos con espiras más cortas, con el consiguiente ahorro de material, y minimización de la resistencia óhmica.-

Las laminaciones han sido normalizadas, tratando de eliminar toda pérdida de material en el corte. En la Figura 2-17 siguiente se indican las proporciones de las laminaciones normalizadas, y la forma de efectuar los cortes.-

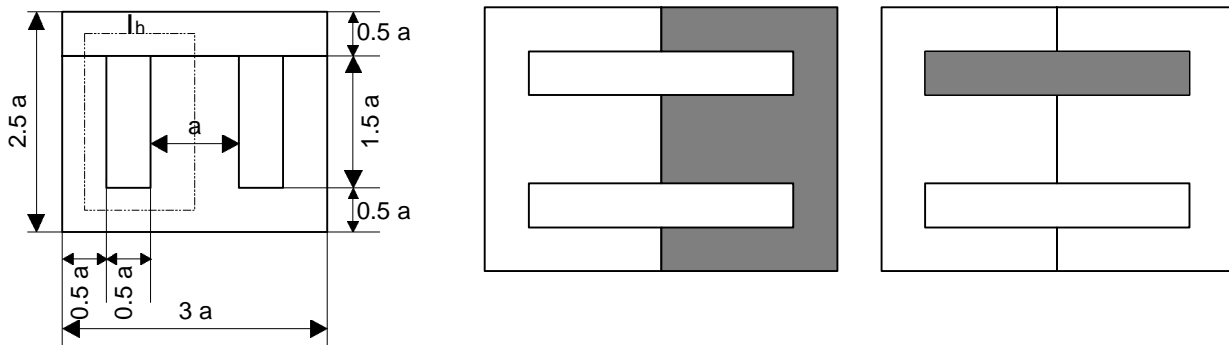


Figura 2-17. Proporciones normalizadas y cortes de chapas para transformadores.

En las laminaciones normalizadas, la longitud del circuito magnético es de  $6 \cdot a$  y el área de la ventana es  $0,75 \cdot a^2$ .-

Las laminaciones normalizadas permiten la construcción de la mayor parte de los transformadores e inductores de los equipos electrónicos; sin embargo algunas veces las ventanas pueden resultar relativamente pequeñas, en estos casos puede solucionarse aumentando la sección del hierro, y como consecuencia disminuye el número de espiras (la sección de la rama central no será cuadrada).-

El espesor del paquete de chapas es lo que se llama apilado  $A$  y puede ser de 1,5 veces  $a$ .-

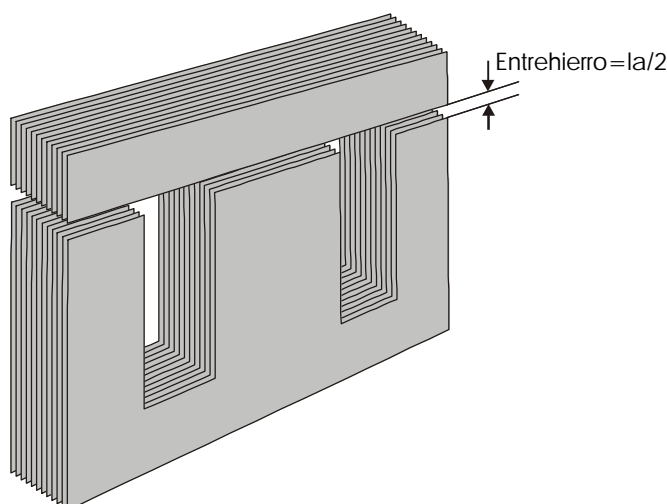
La sección de la rama central es  $S_h = a \cdot A_p$ , en la práctica se afecta a este producto del factor 0,95 (factor de apilado) para tener la sección neta del material magnético.-

Existen chapas E-I de dimensiones no normalizadas, es decir sin relaciones específicas, pero con la condición de que las ramas laterales tengan un ancho no menor a la mitad del ancho de la rama central.-

El agrupamiento de las chapas, presenta fundamentalmente dos modalidades.-

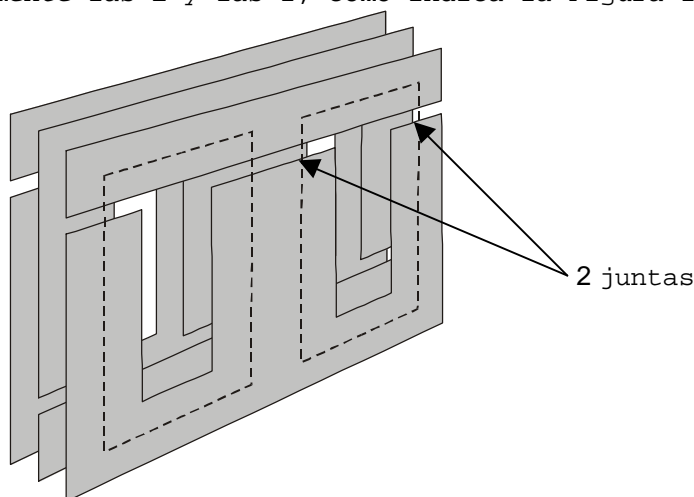
La primera modalidad, llamada **circuito magnético con entrehierro**, consiste en agrupar todas la E formando un paquete, y cerrar el circuito magnético con el paquete de las I. En este caso puede definirse perfectamente un entrehierro que se lo materializa con un papel o cartón, que deberá tener un espesor igual a la mitad del entrehierro calculado. La solución de este circuito se basa en los razonamientos anteriores.-





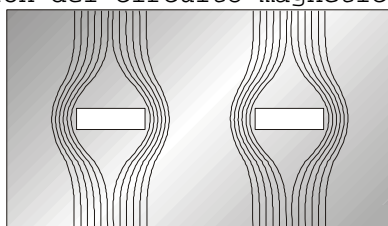
**Figura 2-18. Apilado de chapas E-I.**

La otra modalidad, llamada **circuito magnético con junta**, consiste en apilar alternativamente las E y las I, como indica la Figura 2-19.-



**Figura 2-19. Apilamiento alternado de chapas E-I.**

Este método es empleado cuando no se desea tener entrehierro, y no se lo puede eliminar totalmente. Se trata de reducir al mínimo las consecuencias que puede tener la interrupción del circuito magnético.-

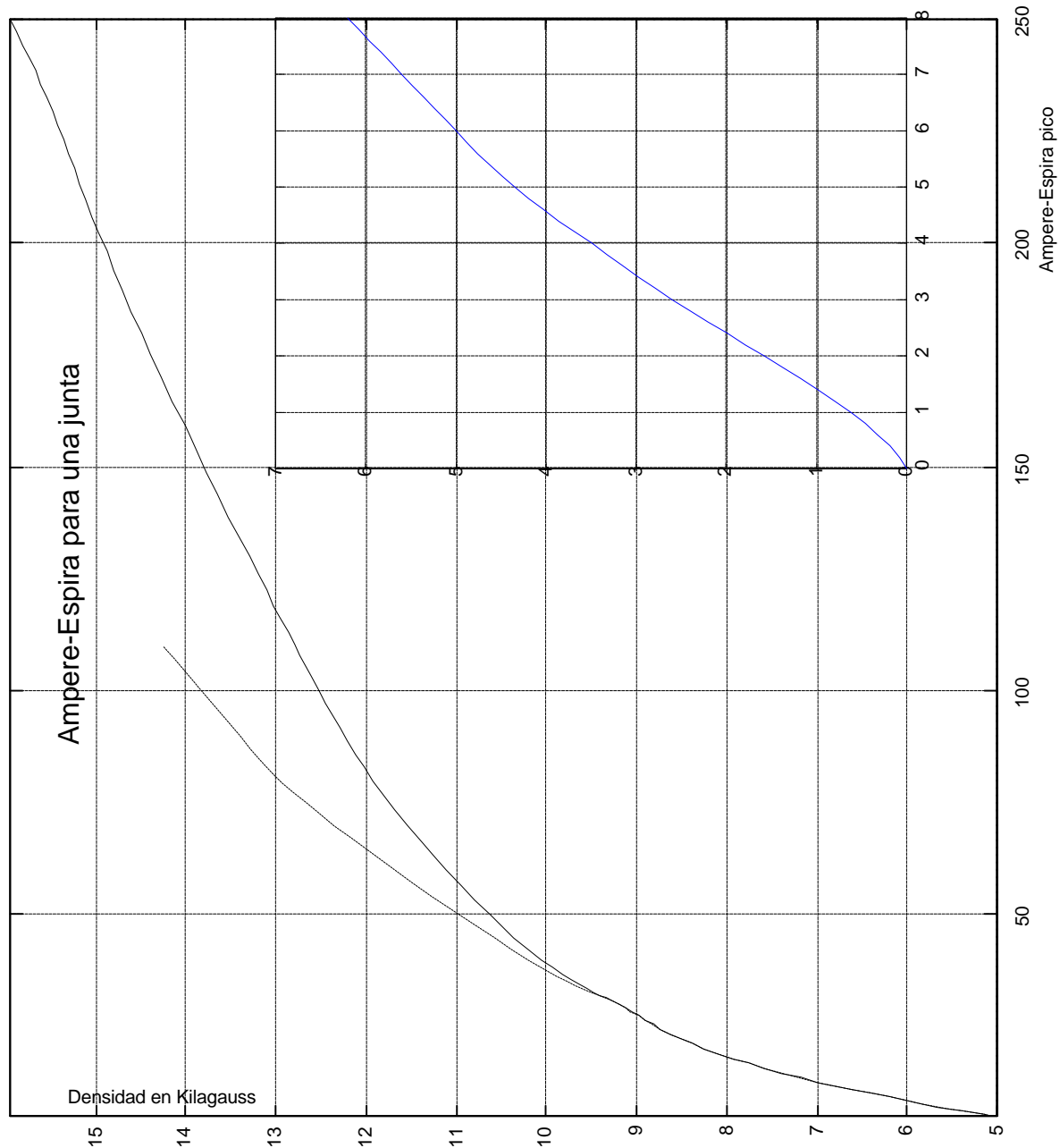


**Figura 2-20. Entrehierro producido por apilamiento alternado.**

Aquí no se puede en rigor, hablar de entrehierro, y se dice que existen juntas (en este caso 2 juntas para cada semicircuito). Por razones constructivas, se produce un entrehierro imprevisible, y el flujo (buscando el camino de menor reluctancia) se establece, por las juntas; como consecuencia, en la zona de la junta se tiene una densidad de flujo mayor, y una posible saturación (Figura 2-20); desde el punto de vista práctico, la junta es comparable a un pequeño entrehierro, por lo tanto parte de la **f.m.m.**, es decir de los Amper-Vuelta aplicados, se utiliza para forzar el flujo a través de la junta. La Figura 2-21 muestra los Amper-Vuelta necesarios para equiparar esta déficit.-

La determinación de los amperios-espira necesarias para compensar la caída de **f.m.m.** en la junta se acostumbra a obtenerla de forma gráfica.-

En base a las experiencias, se han construido curvas que dan, para cada valor de inducción, los amperios-espira necesarios para forzar el flujo a través de cada junta de laminaciones apiladas en forma alternada.-



Ver Transformer Engineering de Le  
Blume, Mar. 10

Obtenida en un laboratorio de RCA Víctor  
Argentina con un transformador fr 4KW.

**Figura 2-21. Amperes-Vueltas necesario para forzar el flujo a través de una juntura.**

En los circuitos magnéticos con juntas, las láminas se apilan generalmente de 1 en 1 (se habla en estos casos de apilamiento 100%). Esta disposición no es la que siempre produce los mejores resultados, especialmente con láminas delgadas, pues se pueden producir fuertes saturaciones en las juntas.-

Otra forma de aplicar las chapas es de 2 en 2; en este caso aumenta la reluctancia del entrehierro, pero puede disminuir la inducción en las zonas

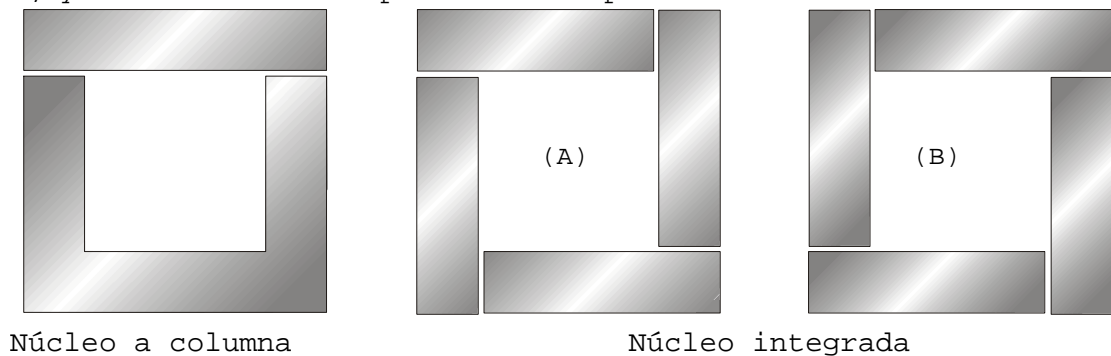
cercanas al entrehierro, y como resultado disminuir la saturación; si esta disminución de saturación compensa, en más, el aumento de reluctancia, esta forma de apilado puede ser conveniente; además el apilado de 2 en 2 exige menor mano de obra. En algunos casos pueden permitirse apilados mayores, aceptando un aumento de la reluctancia equivalente al entrehierro.-

Recordando que estas laminaciones se usan en inductores y transformadores, es interesante hacer notar que la presencia de entrehierro o la junta, no alteran la relación de tensión y flujo, que para variaciones sinusoidales es:

$$E_{ef} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \cdot 10^{-8} [\text{volts}]$$

El único efecto del entrehierro es aumentar la corriente de magnetización.-

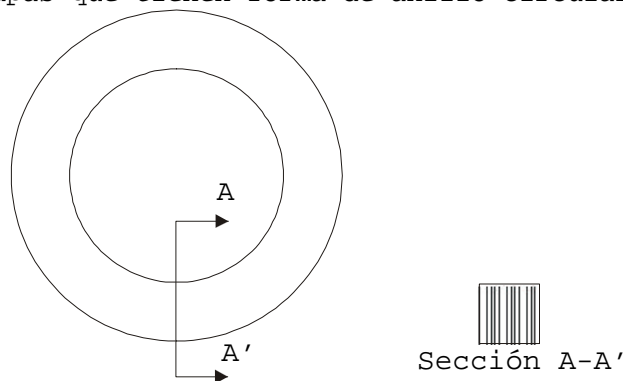
Otro tipo de laminación es la denominada a columna. Esta construcción presenta en general, un flujo disperso ligeramente mayor que la construcción anterior, y el corte tiene de por sí más desperdicios.-



**Figura 2-22. Distintos tipos de núcleos y modo de apilado.**

Un tercer tipo, usado cuando los transformadores pasan de cierta potencia es el de **núcleo integrado** que se construye con láminas rectangulares dispuestas alternativamente. Se montan 4 láminas, según la disposición (A), luego 4 según la disposición (B), luego nuevamente 4 según (A) y así sucesivamente.-

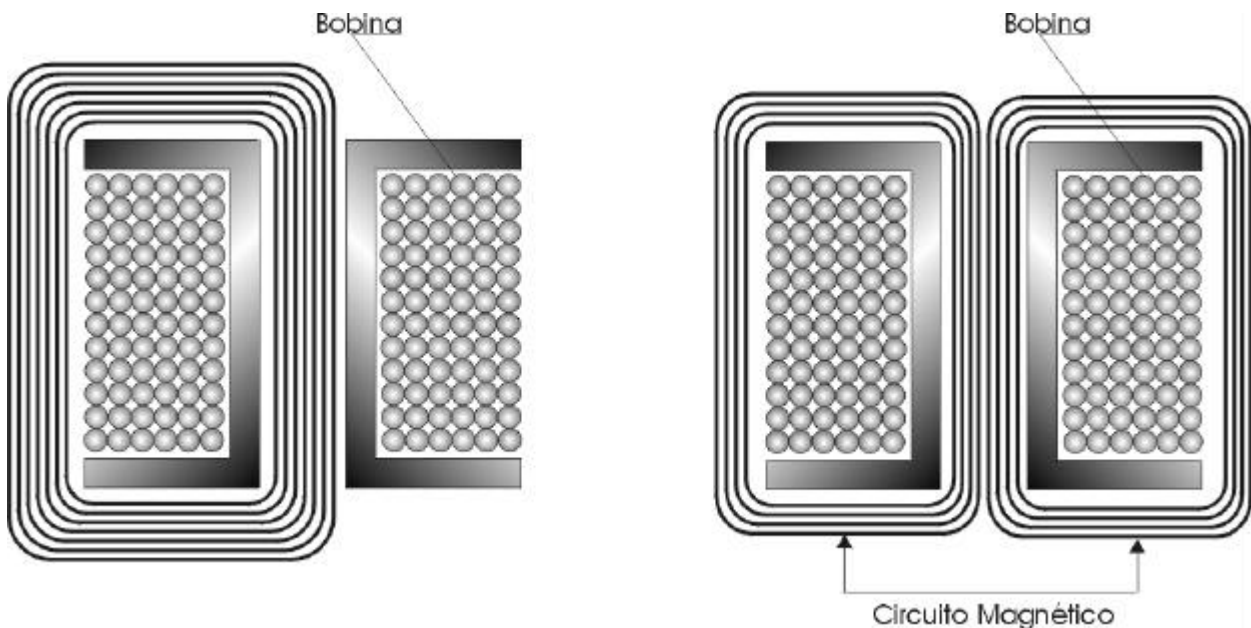
Cuando no se desea tener junta, ni entrehierro se puede formar los núcleos agrupando chapas que tienen forma de anillo circular.-



**Figura 2-23. Chapas de forma circular.**

Con este tipo de núcleo, prácticamente no se tiene dispersión de flujo.-

Finalmente cabe mencionar la construcción de núcleos magnéticos mediante una cinta continua de material magnético; arrollado generalmente en forma de espiral.-

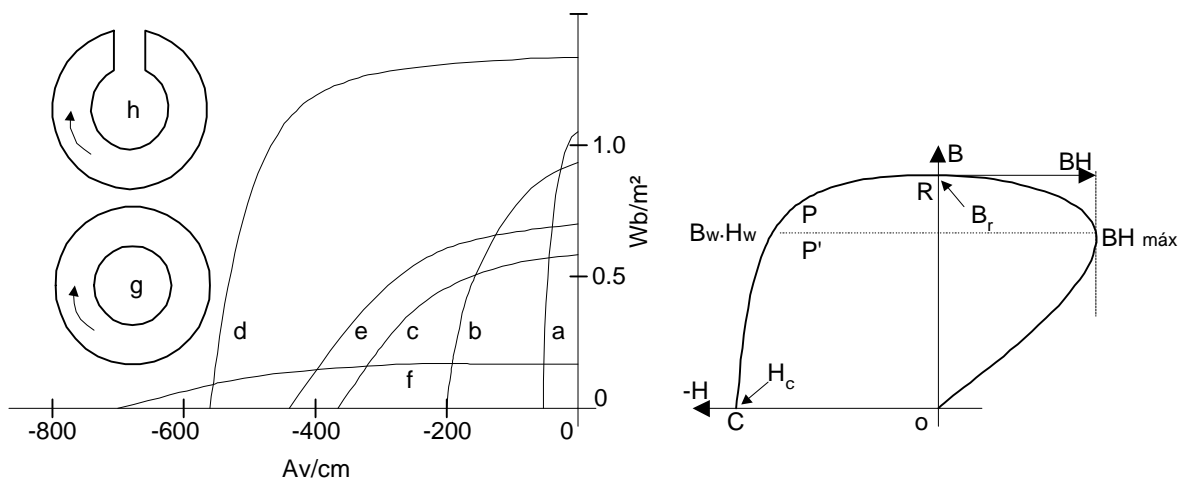


**Figura 2-24. Núcleo construido mediante una cinta continua de material magnético.**

Este sistema permite una utilización racional de las planchas de grano orientado, cortando las cintas en el sentido de la laminación.-

### 2.3.2 Imanes permanentes

La función de un imán permanente es, corrientemente, mantener un flujo magnético determinado, en un entrehierro de dimensiones también determinadas.-



#### Referencias

- a) Acero al tungsteno (6% W, 0.9% C)
- b) Acero al cobalto (35% Co, 3.5% Cr, 8%W, 1% C)
- c) "Alnico" (10% Al, 18% Ni, 12% Co, 6% Cu, 1% Nb)
- e) Polvo de Hierro
- f) "Vectolite"
- g) Imán de aro cerrado
- h) Imán de aro con entrehierro
- "Vectolite" (30%  $Fe_2O_3$ , 44%  $Fe_3O_4$ , 25%  $Co_2O_3$ )

**Figura 2-25. Curvas de desmagnetización de algunos materiales para imanes permanentes.**

Si un imán formado por un anillo cerrado se lo magnetiza hasta la saturación y luego se retira la fuerza magnetizante, queda magnetizado con un

valor de magnetismo remanente correspondiente al punto  $B_r$ , pero evidentemente para poder aprovechar este magnetismo remanente es necesario abrir el circuito, es decir, introducir un entrehierro donde se pueda utilizar el flujo magnético.-

Introducir un entrehierro implica aplicar una fuerza desmagnetizante, y como consecuencia el punto de funcionamiento se desplaza siguiendo la curva de desmagnetización; este desplazamiento es función de las dimensiones tratando de optimizar el circuito.-

Normalmente las propiedades de los materiales para imanes permanentes se indican con las curvas correspondientes al segundo cuadrante del ciclo de histéresis, que son las que corresponden al material del imán sometido a un campo desmagnetizante.-

### **2.3.2.1 Proyecto de un imán permanente**

La primera consideración de importancia en el proyecto de un imán es la relativa al circuito de utilización, que puede ser estático o dinámico; el segundo caso corresponde a circuitos con campos desmagnetizantes alternos o con entrehierros variables, como en los imanes de las máquinas dinamoeléctricas, etc., y en estos casos, los imanes están expuestos a ciclos de retroceso.-

En un circuito estático la función del imán es la de establecer un campo magnético de determinada intensidad en un entrehierro definido.-

A continuación se analizará un modelo simple de circuito estático (Figura 2-26).-

Consta de un imán de sección  $S_i$  y longitud  $l_i$ , y de un entrehierro de sección  $S_a$  y longitud  $l_a$ .-

En un principio se desprecia la dispersión. Se consideran homogéneos los campos del imán y del entrehierro; y se considera el hierro dulce que forma parte del circuito magnético como conductor perfecto del flujo magnético, es decir que el campo magnético en el hierro es nulo. Las magnitudes que definen el comportamiento de este modelo simplificado son: el campo externo  $H_a$  y la inducción  $B_a$  en el entrehierro; el campo interno  $H_i$  y la inducción  $B_i$  en el imán; las dimensiones del imán  $S_i$  y  $l_i$  y las del entrehierro  $S_a$  y  $l_a$ .-

Estas cantidades están vinculadas por las siguientes relaciones que permiten calcular en primera aproximación, el imán; estas relaciones son:

$$\text{Ec. 2-1} \quad \Phi_i = \Phi_a$$

$$\text{Ec. 2-2} \quad B_i \cdot S_i = B_a \cdot S_a$$

$$\text{Ec. 2-3} \quad \oint H \cdot d\ell = 0$$

$$\text{Ec. 2-4} \quad H_i \cdot \ell_i + H_a \cdot \ell_a = 0$$

$$\text{Ec. 2-5} \quad H_i \cdot \ell_i = \frac{-B_a}{\mu_0} \cdot \ell_a$$

$$\text{Ec. 2-6} \quad B_i = f(H_i)$$

multiplicando miembro a miembro la segunda y la sexta ecuación, y teniendo en cuenta que:

$$\text{Ec. 2-7} \quad S_i \cdot \ell_i = V_i$$

$$\text{Ec. 2-8} \quad S_a \cdot \ell_a = V_a$$

se tiene que:

$$\text{Ec. 2-9} \quad B_i \cdot H_i \cdot V_i = \frac{B_a^2}{\mu_0} \cdot V_a$$

y por tanto:

$$\text{Ec. 2-10} \quad V_i = \frac{B_a^2}{\mu_0} \cdot \frac{V_a}{B_i \cdot H_i} = \mu_0 \cdot H_a^2 \cdot \frac{V_a}{B_i \cdot H_i}$$

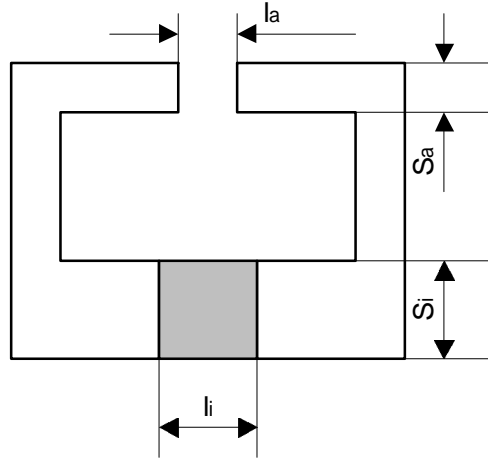


Figura 2-26. Circuito magnético estático.

El problema se desarrolla en torno a un entrehierro determinado, y a una intensidad de campo también determinada; y de esta última ecuación se deduce que para que el volumen del imán  $V_i$  sea lo más pequeño posible es necesario buscar un diseño que permita que el producto  $B_i \cdot H_i$  sea lo más grande posible; este producto se expresa en [Joule/m<sup>3</sup>] y se denomina **producto energético** (Figura 2-27). El producto se anula para valores nulos de  $B$  y de  $H$ , y tiene una valor máximo  $(B \cdot H)_{\max}$ , al que corresponde el máximo rendimiento volumétrico del imán.-

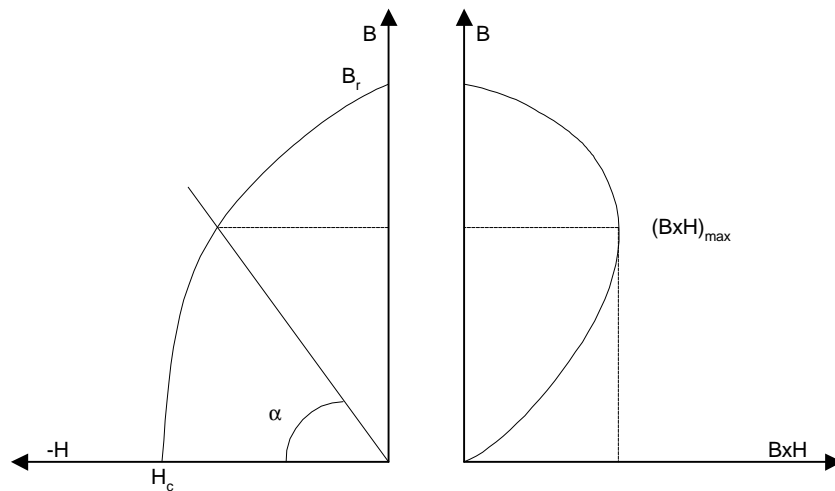


Figura 2-27. Curva de desmagnetización.

### 2.3.2.1.1 Geometría del imán

La longitud del imán se la obtiene de la ecuación:

$$\ell_i = \frac{-H_a}{H_i} \cdot \ell_a$$

y la sección transversal del imán puede despejarse de la segunda ecuación

$$S_i = \frac{B_a}{B_i} \cdot S_a$$

### 2.3.2.1.2 Recta de carga

La pendiente de la recta de carga puede obtenerse dividiendo la segunda por la sexta ecuación

$$\frac{B_i \cdot S_i}{H_i \cdot \ell_i} = \frac{B_a \cdot S_a}{\frac{B_a}{B_i} \cdot \ell_a} \Rightarrow \frac{B_i}{H_i} = \frac{S_a}{S_i} \cdot \frac{\ell_i}{\ell_a} \cdot \mu_0 = \tan \alpha$$

$$H'_a = H_a \cdot \frac{\ell_a}{\ell_i} = H_i$$

Es obvio que el diseño más eficiente es aquel cuya recta de carga corta la curva de desmagnetización exactamente en el punto correspondiente al producto  $(B \cdot H)_{\max.}$ .-

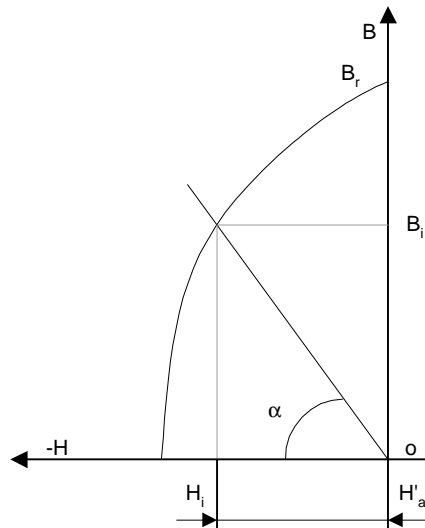


Figura 2-28. Curva de desmagnetización.

### 2.3.2.1.3 Factores de corrección

En la práctica la segunda y cuarta ecuación deben sustituirse por relaciones más precisas:

$$B_i \cdot S_i = B_a \cdot S_a \cdot \delta_1$$

$$H_i \cdot \ell_i = -H_a \cdot \ell_a \cdot \delta_2$$

Donde  $\delta_1$  es un factor de dispersión que tiene en cuenta el hecho de que no todas las líneas de fuerza originadas en el imán se dirigen al entrehierro para formar el flujo útil, sino que algunas se dispersan entre los extremos del imán, entre el imán y partes del circuito de hierro dulce, etc.. Además si el entrehierro no es muy corto, las líneas de fuerza no son rectas, sino que se expanden entre las piezas polares, decreciendo el flujo útil en el entrehierro propiamente dicho.-

$\delta_2$  es un factor de reluctancia debido a la existencia de uniones y posibles saturaciones.-

Estos coeficientes son de difícil determinación, y normalmente se los evalúa experimentalmente en modelos.-

$\delta_1$  raramente es inferior a 1,65 y normalmente está comprendido entre 2 y 5, pudiendo tomar valores mucho mayores.-

$\delta_2$  normalmente está comprendido entre 1,1 y 1,2 pudiendo llegar algunas veces a 1,5.-

En un altoparlante  $\delta_1$  está comprendido entre 2 y 3.-

Es aconsejable ubicar el imán, lo más cerca del entrehierro para reducir al mínimo el flujo disperso.-

La estructura magnética de un altoparlante puede esquematizarse como se ve en la Figura 2-29 donde  $S_a = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot b$ .-

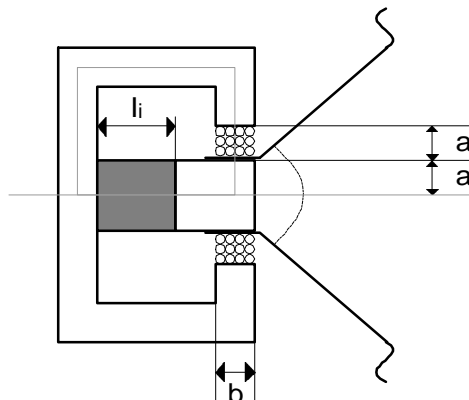


Figura 2-29. Estructura magnética de un altoparlante.

### 2.3.2.2 Imanes en circuitos dinámicos

En este caso los imanes están expuestos a ciclos de retroceso. Esto sucede cuando el campo desmagnetizador no es constante. Ejemplos: el caso de la corriente alterna que circula por la bobina de un receptor telefónico, o el caso del entrehierro variable de una máquina dinamoeléctrica con imanes permanentes.-

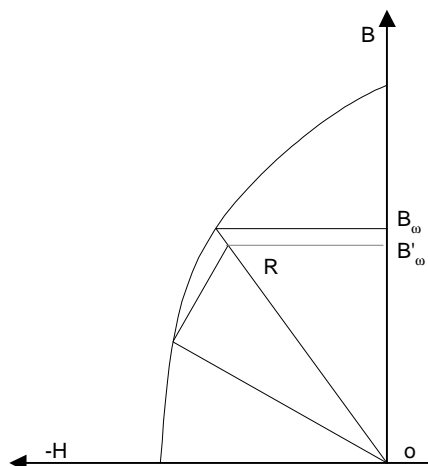


Figura 2-30. Curva de desmagnetización de imanes en circuitos dinámicos.

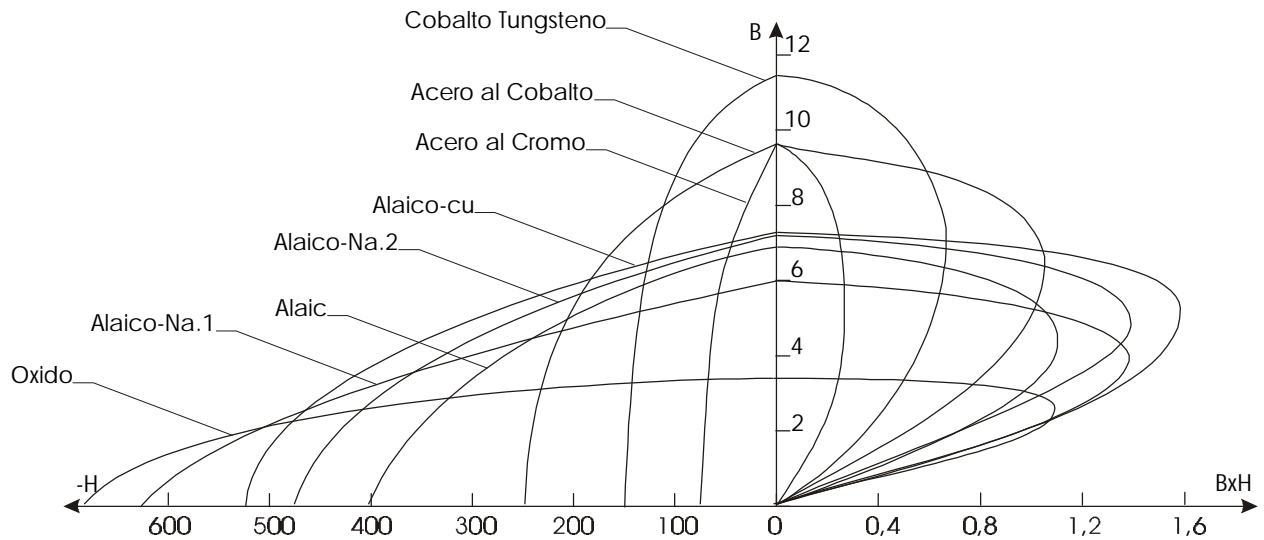
En estos casos, ya sea por que varía el entrehierro y como consecuencia la pendiente de la recta de carga, o por la influencia de un campo desmagnetizante alterno, el punto de funcionamiento se desplaza de Q a P, siguiendo la curva de desmagnetización, pero puede observarse en la Figura 2-30 que al desaparecer la influencia desmagnetizante no se recupera el valor original de inducción, sino que el punto de funcionamiento se ubica en R, es decir el imán ha sufrido una desmagnetización permanente; ahora bien, este imán no vuelve a sufrir nuevos procesos de desmagnetización permanente, aún sometiéndolo a campos desmagnetizantes externos, mientras estos no superen el



valor del que lo desmagnetizó; es decir que el imán se ha estabilizado en el valor de inducción  $B_0'$ , correspondiente al punto R.-

Este razonamiento indica que cuando se prevén campos desmagnetizantes alternos, hay que modificar los criterios de diseño.-

Existen materiales para imanes permanentes cuya curva de desmagnetización esta formada en su mayor parte por una línea recta de igual ángulo que la línea de retroceso, y por lo tanto no sufren las consecuencias de los campos desmagnetizantes.-



**Figura 2-31. Curvas de desmagnetización de distintos materiales manéticos.**



### 3 CAPÍTULO III

#### 3.1 El calor y la sobreelevación de temperatura

Cuando un material está sometido a la acción de campos eléctricos o magnéticos se calienta, pues parte de la energía del campo se disipa dentro del material transformándose en pérdidas que pueden ser: dieléctricas, magnéticas o por conducción.-

En todos los casos esta energía perdida se convierte en calor, a razón de 860Kcal/Kw·h de energía convertida y eleva la temperatura del material; esta elevación de temperatura continúa hasta que llega al equilibrio térmico, es decir al punto en el cual el calor generado es igual al calor transmitido al medio que rodea al material; a partir de ese momento la temperatura del material permanece constante.-

Teniendo en cuenta que la temperatura afecta, en mayor o menor grado, el comportamiento de los materiales o su estabilidad, es la elevación de temperatura, más que las consideraciones mecánicas o eléctricas, la que limita en general la potencia que pueden manejar muchos dispositivos eléctricos o electrónicos, por lo que el estudio térmico es un factor importantísimo en el diseño.-

El problema es mantener la temperatura interna de un material, o componente, dentro de los límites permisibles, para lo cual es necesario analizar la transmisión del calor generado.-

De lo anterior puede deducirse que la etapa de diseño de un dispositivo eléctrico o electrónico es verificar que la sobreelevación de temperatura sea inferior a la máxima prefijada.-

Los mecanismos de conducción del calor son tres:

1. Conducción.
2. Radiación.
3. Convección.

##### 3.1.1 Conducción

Conducción es el mecanismo de transmisión de calor a través de una substancia. La cantidad de calor transmitida por conducción es proporcional a la sección de propagación del calor y a la diferencia de temperatura e inversamente proporcional a la resistividad térmica y a la longitud de pasaje del flujo calórico.-

$$W = \frac{S \cdot \theta}{r_0 \cdot \ell}$$

W: Cantidad de calor en wattios.

S: Sección en centímetros cuadrados.

$\theta$ : Diferencia de temperatura en grados centígrados.

l: Longitud del pasaje del flujo en centímetros.

$\rho_0$ : Resistividad térmica.

Material	Resistividad [ $^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{cm}^2$ ]
Cobre puro	0,227
Cobre industrial	0,287
Hierro forjado	1,27
Hierro fundido	2,5
Acero	6,1
Aluminio	0,76
Mica	280
Cartón prensado (impreg)	700
Porcelana	110

Tabla 3-1. Resistividad térmica de algunos materiales.

### 3.1.2 Radiación

Todo cuerpo cuya temperatura es superior a la del medio que lo rodea, irradia energía calórica en forma de ondas. La máxima energía irradiada está vinculada a determinada longitud de onda que es función de la temperatura, a medida que la temperatura aumenta el punto de máxima irradiación de energía se desplaza hacia la zona de longitudes de onda más cortas. En general la máxima irradiación de energía está dentro de la zona del infrarrojo.-

Se ha demostrado matemáticamente, que la superficie efectiva de radiación es la envolvente exterior del cuerpo, cualquiera sea la forma del mismo. Sin embargo, esto es válido solamente cuando la superficie tiene una emisividad o factor de irradiación, igual a la unidad, por ejemplo, una superficie negra o mate.-

Si la emisividad es mucho menor que la unidad, la superficie radiante efectiva es menor, debido a reflejos o irradiaciones sucesivas. No obstante la emisividad de la mayor parte de las superficies usadas en la práctica es del orden de 0,90 a 0,95 lo que permite admitir que la superficie efectiva de radiación es igual a la superficie envolvente.-

La ley de Stefan-Boltzman establece que el calor irradiado por unidad de superficie es:

$$W_r = k \cdot E \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

en donde:

$W_r$ : Watt por  $\text{cm}^2$  de superficie.

$k$ :  $0,57 \cdot 10^{-11}$

$E$ : Coeficiente de emisividad.

$T_2$ : Temperatura absoluta del cuerpo.

$T_1$ : Temperatura absoluta del ambiente.

<i>Superficie</i>	<i>Coef. de emisividad</i>
Negra, ideal	1.00
Pintura gris	0.95
Latón pulido	0.60
Pintura de aluminio	0.55
Negro de humo	0.95
Barniz blanco	0.95
Cobre	0.15
Plata muy pulida	0.02

**Tabla 3-2. Emisividad de algunas superficies (a bajas temperaturas).**

La emisividad varía con la temperatura, pero esta variación es muy pequeña dentro de las temperaturas normales de funcionamiento de los equipos electrónicos ( $0-100^\circ\text{C}$ ) por lo que puede considerarse como constante.-

En la Figura 3-1 está representado gráficamente el calor irradiado en función del aumento de temperatura, para un valor de  $E=0,95$  y para distintos valores de temperatura ambiente. Hasta una sobreelevación de  $75^\circ\text{C}$  la expresión del calor irradiado puede con bastante aproximación escribirse como:

$$W_r = k_1 \cdot E \cdot q^n$$

donde

$W_r$ : Watt por  $\text{cm}^2$  de superficie.

$k_1$ :  $0,285 \cdot 10^{-3}$  para  $0^\circ\text{C}$ .

$\theta$ : sobreelevación de la temperatura en  $^\circ\text{C}$ .

$n$ : exponente variable con la temperatura, por ejemplo:

para  $\theta = 0^\circ\text{C}$  ;  $n=1,17$

para  $\theta = 25^\circ\text{C}$  ;  $n=1,19$

para  $\theta = 50^\circ\text{C}$  ;  $n=1,21$

De la Figura 3-1 puede verse que el calor irradiado  $W_r$  aumenta aproximadamente un 1,1% para cada grado de aumento de la temperatura ambiente entre  $0^\circ\text{C}$  y  $50^\circ\text{C}$ .-

Tomando como promedio la temperatura de 25°C la expresión anterior puede escribirse como:

$$W_r = 0,285 \cdot 10^{-3} \cdot q^{1,19} \cdot E \cdot \left( 1 + \frac{1,1 \cdot q_n}{100} \right)$$

Esta expresión puede usarse hasta sobreelevaciones del orden de los 75°C a 80°C.-

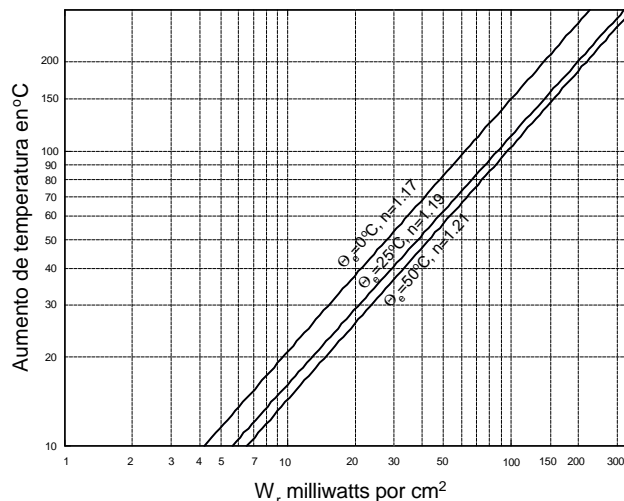


Figura 3-1. Calor irradiado a distintas temperatura ambientes.

### 3.1.3 Convección

Cuando un cuerpo caliente está sumergido en un fluido, la temperatura del fluido (aire o líquido) aumenta disminuyendo su densidad; el fluido menos denso sube y es reemplazado por otro más pesado, estableciéndose así un proceso continuo de circulación denominado convección. Pese a que existen fórmulas analítica muy desarrolladas que expresan el calor transferido por convección en gases y líquidos, la experiencia demuestra que en la mayoría de los casos es suficientemente exacta la siguiente fórmula:

$$W_c = K_2 \cdot q^m$$

donde

$W_c$ : Watt por  $\text{cm}^2$  de superficie.

$K_2$ :  $0,217 \cdot 10^{-3}$  para 0°C.

$\theta$ : sobreelevación de la temperatura en °C.

$m$ : exponente variable entre 1,0 y 1,25 según la forma y la posición de las superficies refrigeradas.

El valor de  $K_2$  está dado para superficies planas, en el aire, de alturas iguales o mayores a 0,5m, a nivel del mar y para sobreelevaciones de temperatura de hasta 75°C.-

Se ha determinado también que la pérdida de calor varía con la raíz cuadrada de la densidad relativa del aire. Además si se trata de superficies verticales no lisas, por ejemplo rugosas u onduladas, es necesario aplicar un factor de conversión, coeficiente de rozamiento del aire, que se determina experimentalmente. La determinación de la pérdida de calor por convección puede escribirse como:

**Ec. 3-1** 
$$W_c = 0,217 \cdot 10^{-3} \cdot q^{1,25} \cdot F \cdot \sqrt{P}$$

donde

$W_c$ : Watt por  $\text{cm}^2$  de superficie.

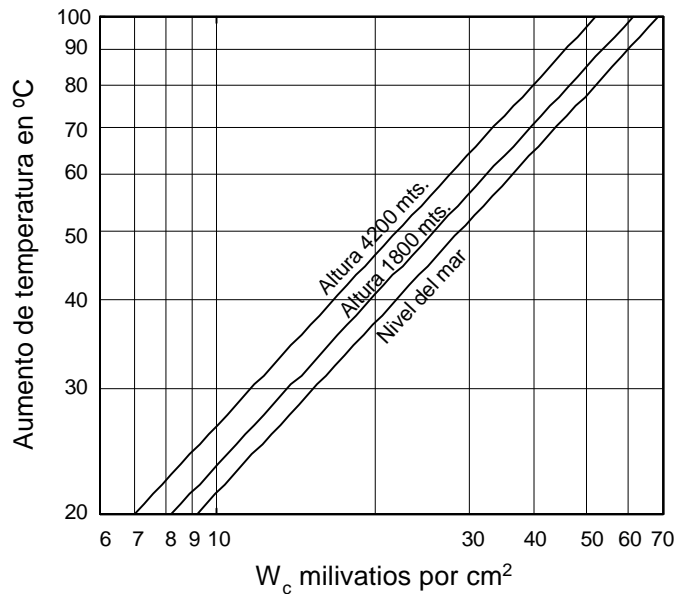
$F$ : Coef. de rozamiento del aire (igual a la unidad para superficies planas).

**P:** densidad relativa del aire (Tabla 3-3).

Altura	Densidad relativa
0	1.00
600	0.93
1200	0.86
1800	0.80
2400	0.74
3000	0.68
3600	0.63
4200	0.58

**Tabla 3-3. Densidad relativa del aire según altura.**

En la Figura 3-2 están representadas las curvas de las pérdidas de calor por convección en función del aumento de temperatura en °C para diferentes altitudes.-



**Figura 3-2. Pérdidas por convección en milivatios por centímetro cuadrado de superficie.**

La **Ec. 3-1** y el gráfico de la Figura 3-2 se utilizan solamente para superficies planas verticales.-

Las pérdidas por convección en las superficies planas horizontales son del orden de 15% a 20% más si se refieren a las superficies horizontales superiores, y mucho menor, y variable según la extensión de la superficie cuando se refieren a las caras inferiores.-

El color de la superficie no ejerce influencia sobre la transmisión del calor por convección. La temperatura ambiente no ejerce influencia apreciable en la disipación de calor por convección, la que es función si de la sobreelevación de temperatura.-

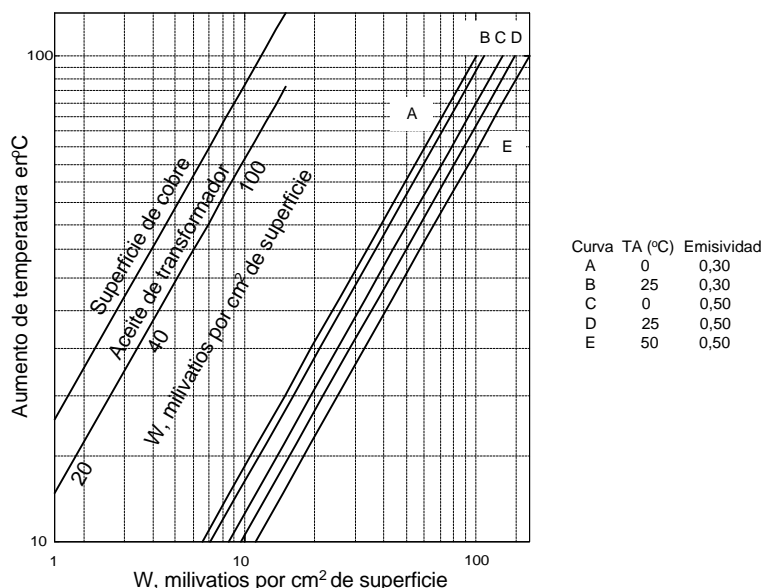
### 3.1.4 Radiación y convección

La cantidad de calor total transmitido por la superficie de un cuerpo será la suma del calor transmitido por radiación más el transmitido por convección. En el caso de superficies planas verticales se tiene:

$$W_t = W_r + W_c = 0,285 \cdot 10^{-3} \cdot q^{1,19} \cdot E \cdot \left( 1 + \frac{1,1 \cdot q_n}{100} \right) + 0,217 \cdot 10^{-3} \cdot q^{1,25} \cdot F \cdot \sqrt{P} \left[ \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2} \right]$$

En la Figura 3-3 están indicadas las pérdidas totales (radiación + convección), en función de la elevación de temperatura, de superficies verticales, en ambientes de 0°C, 25°C y 50°C, y con diferentes valores de

emisividad. De esta figura se desprende que la transmisión de calor de una superficie plana vertical a 25°C de temperatura ambiente es debida en un 45% a la convección y en un 55% a la radiación. A 0°C de temperatura ambiente las pérdidas se dividen aproximadamente por mitades.-



**Figura 3-3. Pérdidas por radiación y convección de las superficies verticales en función del aumento de temperatura para tres temperaturas ambientes distintas y dos emisividades diferentes.-**

### 3.1.5 Calculo de la sobreelevación de temperatura

Para calcular la sobreelevación de temperatura se deben conocer: la potencia disipada (por Joule, Foucault, histéresis, etc.) y la superficie de evacuación del calor; en base a estos valores se determinan los vatios por unidad de superficie; y del gráfico se obtiene la sobreelevación de temperatura  $\Phi$ , sobre la temperatura ambiente  $\Phi_a$ ; la suma de ambas ( $\Phi + \Phi_a$ ) debe estar por debajo del valor máximo prefijado.-

Las pérdidas totales en el hierro, son iguales al producto de la pérdidas por unidad de peso [W/Kg], por el peso del hierro que se obtiene multiplicando el volumen del hierro [dm³] por su peso específico (7,8Kg/dm³).-

La pérdidas en el cobre son iguales a  $R \cdot I^2$ .-

Como superficies de evacuación del calor se toman normalmente las superficies laterales y superiores de los elementos.-

Conviene evacuar por separado las pérdidas en el hierro y en el cobre, sus respectivas superficies de evacuación del calor, y determinar independientemente la sobreelevación de temperatura del hierro y del cobre.-

Si la sobreelevación de temperatura del hierro es excesiva se debe reducir la inducción B, aumentando el número de espiras o la sección del núcleo.-

Si la sobreelevación de temperatura de cobre es excesiva se debe aumentar la sección del conductor.-

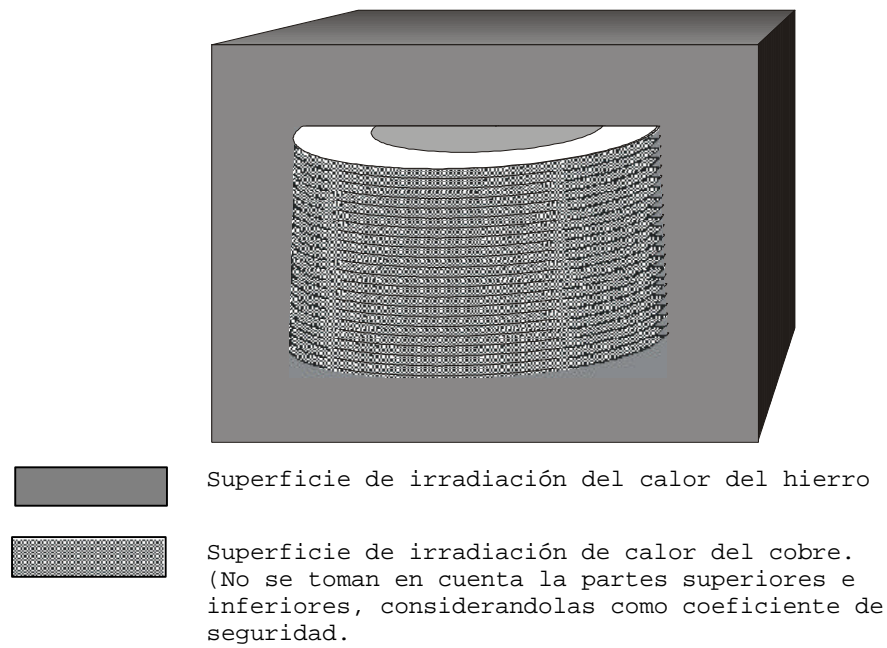


Figura 3-4. Superficies de irradiación de un trafo.

### 3.1.6 Diagrama de transferencia de calor por radiación y convección

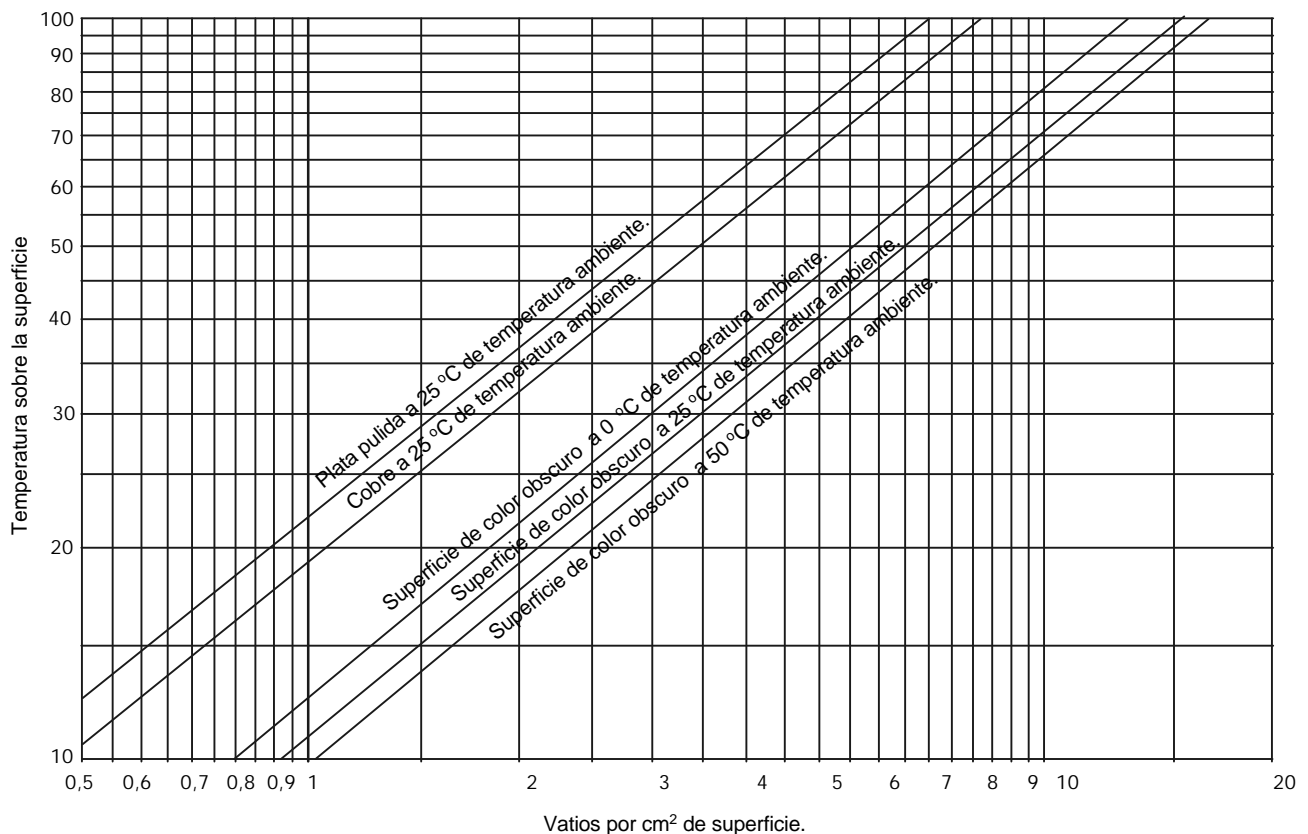


Figura 3-5. Transferencia de calor desde una superficie plana vertical.



## 4 CAPÍTULO IV

### 4.1 Alambres y Cables

Los conductores eléctricos presentan diferentes formas según sean sus usos. Pueden ser: alambres, cables, cintas, barras cuadradas o rectangulares, perfiles (ángulos 'U' o especiales), etc..-

Las formas más corrientes son la de alambres redondos y la de cables.-

#### 4.1.1 Definiciones

- **Conductor:** Alambre o conjunto de alambres (o hilos) no aislados entre sí y adecuados para conducir corriente eléctrica; puede ser monofilar (un alambre) o multifilar (más de un alambre).
- **Conductor multifilar:** Conductor constituido por un conjunto de alambres (no aislados entre sí) agrupados y cableados o torsionados.
  - **Cableado:** Procedimiento de formación de un conductor multifilar por colocación en forma helicoidal de alambres o de torzales, produciendo capas sucesivas, independientes y concéntricas.
  - **Torsionado:** Procedimiento de formación de un conductor multifilar por retorcimiento de un haz de alambres, que adopta una forma helicoidal.
- **Torzal:** Cada uno de los haces de alambre que entran como una unidad en la formación de un conductor cableado compuesto; estos haces pueden ser cableados o torsionados.
- **Cable:** Elemento constituido por un conductor multifilar (cable monoconductor) o varios conductores (cable multiconductor) y un material aislante que lo aísla del ambiente y entre sí, pudiendo o no tener un revestimiento común.

#### 4.1.2 Clasificación

Los conductores usados en electrónica se fabrican generalmente con cobre electrolítico recocido, de resistividad no superior a  $0,0172\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  a  $15^\circ\text{C}$ .-

Estos conductores según su uso se clasifican en:

- Para conexiónado
- Para arrollamiento
- Para radio frecuencia

##### 4.1.2.1 Conductores para conexiónados

La corriente que atraviesa un conductor provoca un aumento de temperatura de este, a causa de la energía disipada, debido a su resistencia ( $P=R \cdot I^2$ ). La elevación de temperatura en el conductor depende de las posibilidades que este tenga de disipar el calor producido; posibilidades que quedan limitadas por el revestimiento aislante que normalmente representa también un elevado aislamiento térmico, y por la limitada ventilación debido a la proximidad y protección de los aparatos.-

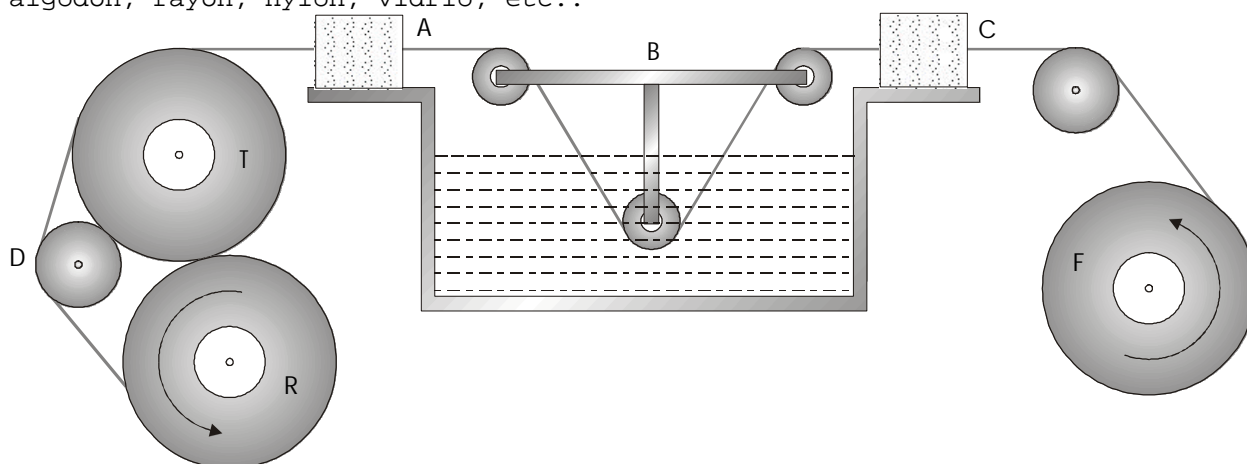
Para los conductores de conexión en equipos con ventilación natural obtenida mediante adecuadas aberturas, es aceptable una elevación de temperatura de  $20^\circ\text{C}$  y a tal fin es necesario adoptar una sección correspondiente a una densidad de corriente de  $6\text{A}/\text{mm}^2$ .-

Es necesario tener en cuenta la caída de tensión que tiene lugar con una determinada intensidad de corriente ya que el cálculo anterior puede arrojar un conductor de resistencia elevada para el empleo destinado.-

Por otra parte es necesario considerar que en algunos casos un aumento de temperatura de  $20^\circ\text{C}$  a  $75^\circ\text{C}$  da lugar a un aumento de resistencia, en un conductor de cobre, de aproximadamente el 20%.-

Estos conductores está formados por uno o varios alambres arrollados entre sí de cobre estañado y de diámetros comprendidos entre  $0,35\text{mm}$  y  $0,4\text{mm}$ ,

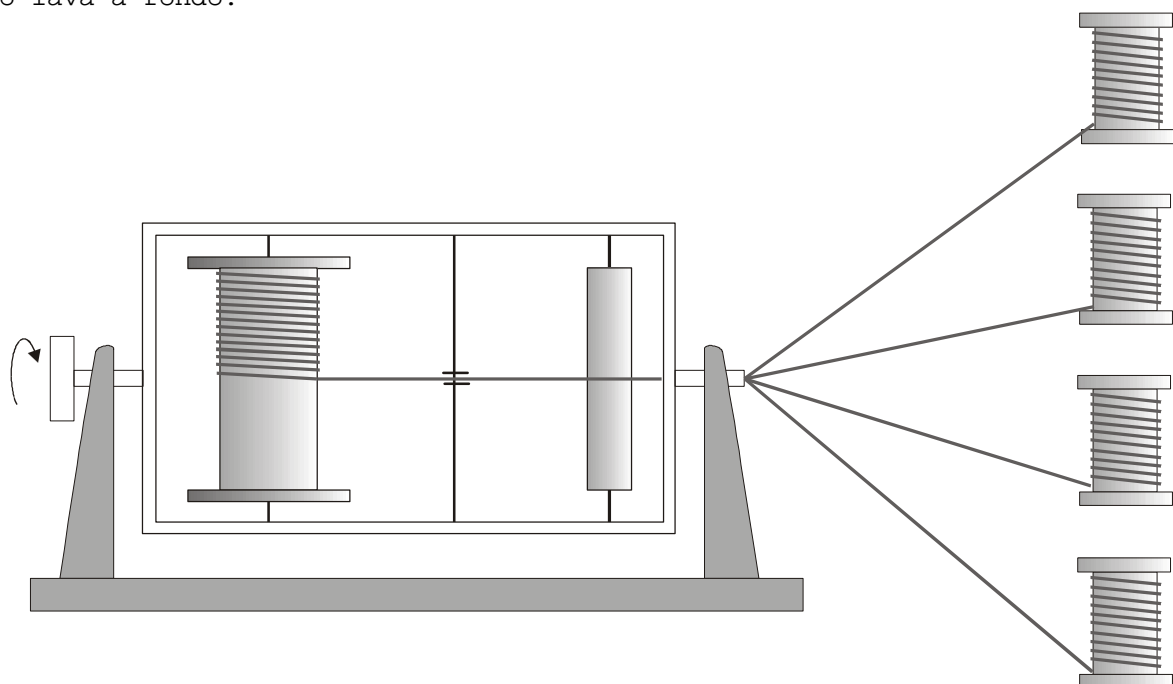
normalmente cubiertos por un aislamiento primario que puede ser de caucho (natural o sintético) o de un plástico elastómero y sobre este aislamiento (o sobre el conductor) se superpone a veces una cubierta hecha de fibra de algodón, rayón, nylon, vidrio, etc..-



**Figura 4-1. Dispositivo para el estañado.**

No se utilizan alambre de diámetro inferior a 0,5mm por haberse notado una tendencia a la cristalización del metal por la acción de una vibración prolongada. Los alambres son normalmente de cobre electrolítico, trefilados<sup>34</sup>, recocidos, generalmente estañados y trenzados, esto último cuando se desea obtener conductores muy flexibles; el estañado puede ser por inmersión o galvánico (la cantidad de estaño es aproximadamente el 3% del peso del cobre) y el trenzado, en general en el caso de la cables, puede efectuarse con cableadoras o torsionadoras (los cordones eléctricos son torsionados).-

Para efectuar el estañado, el hilo es limpiado de sus impurezas (como óxido, etc.) haciéndolo pasar por un baño de ácido clorhídrico diluido, luego se lo lava a fondo.-



**Figura 4-2. Torsionadora para la fabricación de conductores destinados a hilos eléctricos o telefónicos.**

El hilo antes de penetrar en el estaño fundido se lo humedece con una solución con cloruro de zinc (fieltros C). Al salir del baño se hace pasar el hilo a través de residuos de amianto (A) que lo liberan del estaño en exceso

<sup>34</sup> Convertir un metal en hilos de distintos grosores por estirado en frío.

y que vuelve a caer en la cuba (**B**). El hilo se arrolla dos veces entorno al tambor (**T**) que gira a velocidad constante, mientras que (**R**) se hace girar por fricción para mantener constante la tensión del hilo.-

La polea (**D**) tiene un movimiento de vaivén que distribuye uniformemente el hilo; cuanto mayor es este más lentamente corre.-

#### **4.1.2.2 Conductores destinados a arrollamientos**

Pertenecen a esta clase los constituidos por un solo hilo de cobre de diámetros desde 0,02mm (aislados por una o dos capas de fibras textiles, como seda o nylon, o esmaltados hasta algunos milímetros).-

Para el arrollamiento de algunos tipos de bobinados para RF se emplean conductores constituidos por un cierto número de hilos delgados esmaltados cableados o dispuestos de forma apropiada, aislados por una o dos capas de seda.-

La densidad de corriente en el conductor será la mínima posible para no tener una sobreelevación excesiva de la temperatura, dada la distribución concentrada de los arrollamientos y la escasa conductibilidad térmica presentada por todos los materiales eléctricos.-

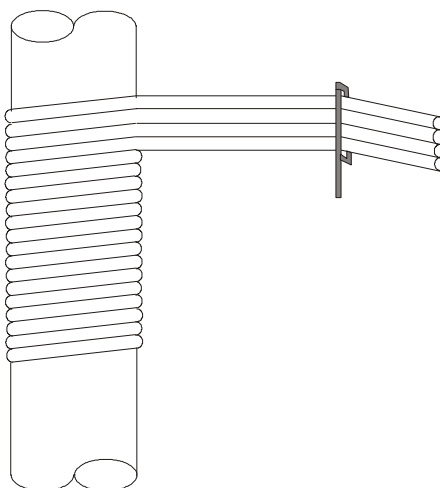
Normalmente se acepta una densidad del orden de los  $3A/mm^2$ .-

#### **4.1.3 Aislamiento de los conductores**

Existen una gran variedad de materiales aislantes, la elección de un tipo determinado depende de un examen de las condiciones eléctricas de funcionamiento y de las del ambiente. Las primeras se refieren a la rigidez dieléctrica, resistencia de aislamiento, factor de pérdida y constante dieléctrica; la segunda se refiere a los límites inferior y superior de temperatura, resistencia a la humedad, al fuego, a la luz solar, a los aceites, agentes químicos, hongos, abrasión, vibración, choque, flexibilidad, etc..-

El aislamiento de los conductores puede realizarse por medio de un revestimiento de fibras como papel, algodón, seda, rayón, nylon, fibra de vidrio, etc.; o con materiales plásticos, caucho vulcanizado o esmaltes, etc..-

##### **4.1.3.1 Aislamientos mediante fibras**



**Figura 4-3. Arrollado de cuatro fibras de algodón sobre un hilo de cobre.**

- **Arrollado:** El aislamiento se obtiene arrollando en un sentido una capa de espiras y sobre ella otra en sentido contrario; de este modo el conductor no puede salir de las espiras.-

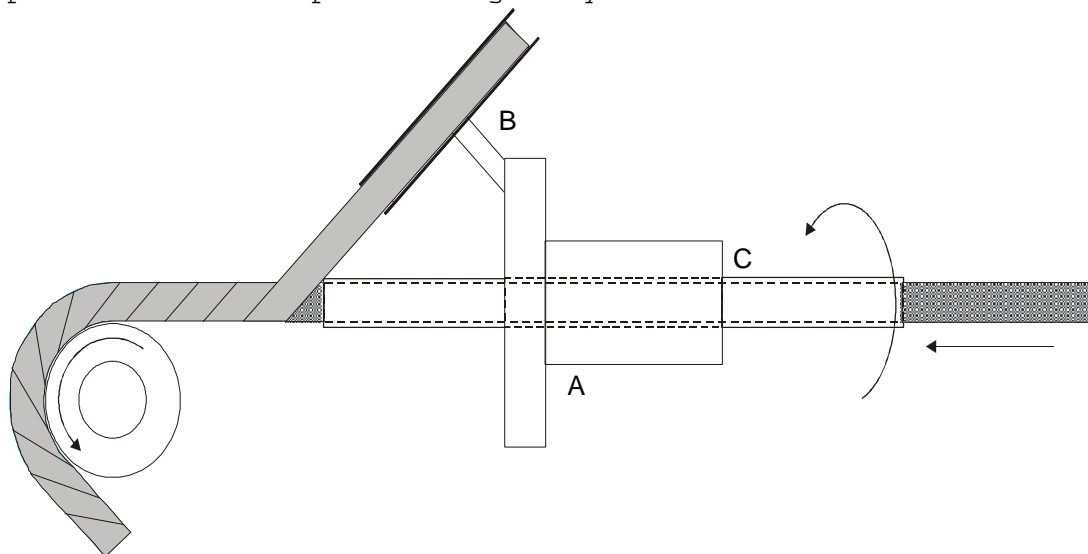
En cada capa se emplean un grupo de hilos para recubrir una determinada longitud del conductor con el menor número de vueltas de

guía hilos; los hilos deben disponerse en forma de cinta, paralelos entre sí sin amontonarse.-

El hilo así compuesto se guía en forma que se arrolle siempre a la misma altura del conductor, que mientras tanto, avanza con movimiento uniforme; de este modo se puede establecer exactamente el paso que debe tener la hélice.-

Los conductores apropiados para trabajar a temperaturas elevadas pueden aislarse con dos hilos de fibra de amianto, pero este revestimiento resulta engorroso. Se recurre entonces al empleo de fibra de vidrio con la que pueden conseguirse capas de 0,025mm de espesor. Estas fibras no deben trabajar próximas a los 250°C pues las resinas con siliconas con que están tratadas empiezan a descomponerse.-

En los conductores cableados la primera capa de fibra debe arrollarse en sentido opuesto al de la hélice de la capa externa del conductor para obtener una superficie regular y sin estrías.-



**Figura 4-4. 2 El brazo B gira mientras el conductor, bien extendido, se desplaza; ambos a velocidad constante.**

- **Trenzado:** Una trenza o funda de revestimiento de un conductor, ya recubierto normalmente por una o más capas aislantes, consiste en dos series de grupos de hilos, arrollada cada una según una espiral y en sentido contrario a la otra. Cada hilo pasa alternativamente por debajo y por encima de los hilos de la otra serie. Se obtiene así un revestimiento tubular del conductor. Normalmente se emplean trenzadoras rotativas.-
- **Encintado:** El encintado con cinta de fibras textiles, barnizadas o no, o con papel, por medio de un dispositivo como el siguiente, B gira a velocidad constante, mientras, el conductor bien extendido pasa a velocidad constante.-

#### **4.1.3.2 Aislamiento con materiales plásticos o caucho**

Puede ser por **extrusión** o por medio de **cinta**.-

Materiales utilizados: Cloruro de Polivinilo, PTC, Polietileno PT, Politetrafluoretileno PTFE, derivados de la celulosa, caucho, etc..-

El cloruro de polivinilo y los demás derivados de la celulosa son muy indicados para el uso de los hilos de conexión por su gran rigidez dieléctrica y resistencia a la humedad, además los aceites y los agentes químicos no lo dañan.-

La limitación que tienen es que se reblandecen por efecto del calor y se resquebrajan por el frío. Además no son convenientes en RF por sus elevados factores de potencia y constante dieléctrica, utilizándose en estos casos el polietileno.-

Los cauchos sintéticos tienen buenas propiedades dieléctricas, pero su resistencia a los solventes no es muy buena. Los compuestos de caucho natural ya casi no se usan para aislamiento de los alambres.-

#### 4.1.3.3 Aislamiento mediante esmaltado

Materiales utilizados: esmaltes a base de oleoresinas, o esmaltes a base de resinas poliamídicas (nylon), alquídicas (siliconas), epoxídicas, poliuretanas, etc.. Los esmaltes a bases de resina epoxídicas y poliuretanas presentan la ventaja de dejar libre al conductor de cobre al calentarlo (los primeros a los 450°C y los segundos a 350°C) permitiendo la soldadura de conductor sin necesidad de una operación preliminar para eliminar el esmalte.-

<i>Tipo de aislante</i>	<i>%</i>
Alambres con dos capas de algodón	100%
Alambres con dos capas de seda	40.5%
Alambres esmaltados y una capa de seda	38.6%
Alambre con una capa de seda	31.8%
Alambres esmaltados	22.2%

Tabla 4-1. Espacio ocupado por distintos tipos de aislantes.

Los esmaltes para alambre surgieron de la búsqueda de vainas aislantes que ocuparan el menor espacio posible.-

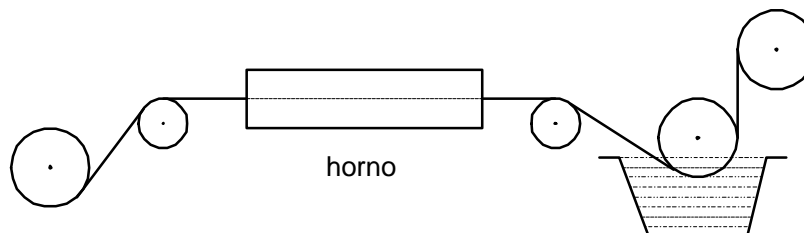


Figura 4-5. Dispositivo para esmaltado de conductores.

#### 4.1.4 Dimensiones de los alambres - Calibres

En la práctica comercial y técnica, ha sido norma durante muchos años, indicar la sección o diámetro de los alambres según determinados calibres (Galgas). Existieron y aún existen diferentes calibres, lo que en la práctica ha producido confusiones. Entre los calibres más conocidos podemos mencionar: el American Wire Gauge (AWG), el British Standar Wire Gauge (SWG), el Birmingham Iron Wire Gauge (BWG), etc..-

Actualmente, en los países que han adoptado el sistema métrico es norma especificar directamente las dimensiones de los alambre en milímetros y aún en los países de habla inglesa hay una tendencia a abandonar los viejos calibres y especificar directamente las dimensiones de los alambres por su diámetro en **mils** (milésima de pulgada) o su sección en **circular mils**.-

**Mil**: Unidad de longitud igual a la milésima de pulgada (0,025mm).

**Circular mil**: Área de un círculo de un **mil** de diámetro.

El área en pulgadas cuadradas del **circular mil** es:

$$a = \frac{p}{4} \cdot (0,001)^2 = 785,4 \cdot 10^{-9} \text{ pulgadas}^2 = 506 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$$

o sea que una sección de  $785,4 \cdot 10^{-9}$  pulgadas<sup>2</sup> será igual a un circular mil de superficie, entonces una superficie en general **A** dada por:

$$A = \frac{p}{4} \cdot (D)^2$$

con **D** expresado en pulgadas, será igual a:

$$A = \frac{\frac{p}{4} \cdot (D)^2}{\frac{p}{4} \cdot (0,001)^2} \cdot a = D^2 \cdot 1.000.000 \cdot a$$

#### 4.1.4.1 Conversión de medidas

Para obtener la sección en Circular Mils a partir de un diámetro **D** en pulgadas, se debe utilizar una constante tal que cuando dicho diámetro **D** sea 0,001 pulgadas, la cantidad de Cir. Mils sea igual a 1, es decir:

$$a = x \cdot \frac{p}{4} \cdot (0,001)^2 = 1 \Rightarrow x = \frac{4}{p \cdot (0,001)^2} = 1273239,545$$

entonces:

$$\text{Cir. Mils} = 1273239,545 \cdot \left( \frac{p}{4} \cdot D^2 \right) = 1.973,5 \cdot \left( \frac{p}{4} \cdot d^2 \right)$$

donde **D** esta en pulgadas y **d** en mm.

#### 4.1.4.2 American Wire Gauge

También conocida como Brown & Sharpe Gauge, fue propuesta por J.R. Brown en 1857. Este calibre tiene la propiedad común a algunos otros calibres de que sus dimensiones representan aproximadamente las distintas etapas sucesivas del proceso de fabricación de los alambres. Como en otros calibres sus número son regresivos correspondiendo a un número mayor un alambre más delgado, como las operaciones de estirado. Los números de este calibre no son arbitrarios sino que responden a una ley matemática sencilla.-

El calibre tiene como base dos diámetros especificados y un número de diámetros intermedios que forman una progresión geométrica. Así el diámetro 0,460" se define como N°00, el diámetro 0,005" como N°39. Hay 40 medidas entre estas dos, por consiguiente la relación del primer diámetro al segundo diámetro esta dado por:

$$a_{39} \cdot p = a_{38}$$

el tercer número será:

$$a_{38} \cdot p = a_{39} \cdot p^2 = a_{37}$$

como conocemos el primero y el ultimo de esta serie se puede obtener **p** haciendo:

$$a_{39} \cdot p^{39} = a_0 \Rightarrow p = \sqrt[39]{\frac{a_0}{a_{39}}} = \sqrt[39]{\frac{0,460}{0,005}} = 1,1229322$$

El cuadrado de esta relación es 1,261. La sexta potencia de esta relación, o sea la relación de un diámetro de número superior en 6 unidades, es de 2,005. El hecho de que esta relación se aproxime tanto a 2 es la base de numerosas relaciones útiles en el cálculo de los alambre.-

- Una disminución de tres números en el calibre duplica la sección y el peso.

$$A_i = \frac{p}{4} \cdot (a_i)^2$$

$$\text{si } a_j = a_i \cdot p^3 \Rightarrow A_j = \frac{p}{4} \cdot (a_j)^2 = \frac{p}{4} \cdot (a_i \cdot p^3)^2 = p^6 \cdot \frac{p}{4} \cdot (a_i)^2 = 2,005 \cdot A_i$$

- Una disminución de seis números duplica el diámetro.

$$a_i \cdot p^6 = a_{i-6} = a_i \cdot 2,005$$

- Una disminución de 10 números multiplica la sección y el peso por 10.

$$A_i = \frac{P}{4} \cdot (a_i)^2$$

$$\text{si } a_j = a_i \cdot p^{10} \Rightarrow A_j = \frac{P}{4} \cdot (a_j)^2 = \frac{P}{4} \cdot (a_i \cdot p^{10})^2 = p^{20} \cdot \frac{P}{4} \cdot (a_i)^2 = 10,1641 \cdot A_i$$

- El alambre N°10 tiene un diámetro aproximado de 0,10 , una sección de 10000Cir.Mils y una  $R=1\Omega$  cada 1000 pies a 20°C (Cobre recocido patrón).

$$a_0 = 0,460'' \Rightarrow a_{10} = \frac{a_0}{p^{10}} = \frac{0,460''}{3,188} = 0,144''$$

#### 4.1.5 Resistencia en radiofrecuencia

En los circuitos por los que circulan corrientes alternadas, particularmente corrientes de alta frecuencia, la pérdida de potencia es mayor que si circulara una corriente continua del mismo valor.-

Esto se debe a factores tales como la histéresis dieléctrica, las corrientes de Foucault, el efecto pelicular, etc.. En consecuencia se acostumbra, al tratar circuitos con corrientes alternadas, considerar que la resistencia efectiva o equivalente del circuito es aquella cantidad que multiplicada por el cuadrado de la corriente sea igual a la potencia disipada en el mismo.-

##### 4.1.5.1 Efecto pelicular

En frecuencias altas, la corriente que circula por el conductor no está uniformemente distribuida en la sección transversal del mismo como en el caso de corrientes continuas, sino que, más bien, tiende a concentrarse más cerca de la superficie. Este fenómeno llamado efecto pelicular, es el resultado de la acción de las líneas de flujo magnético que no rodean uniformemente al conductor.-

Aquellas partes de la sección transversal que están rodeadas por el mayor número de líneas de flujo tienen una inductancia mayor que otras partes del conductor y, en consecuencia una reactancia más elevada. El resultado es una redistribución de la corriente en la sección transversal de acuerdo con la reactancia de las distintas partes, esto es, en las partes más cercanas al centro circula la corriente mínima. Puede decirse que la corriente se concentra en las zonas de máximo campo magnético.-

La redistribución de la corriente en la sección transversal de un conductor, asociado con el efecto pelicular, hace que la relación  $R_{ca}/R_{cc}$  entre la resistencia efectiva a la corriente alternada y la resistencia a la corriente continua sea mayor que la unidad porque, debido a la presencia del efecto pelicular, no todas las porciones del conductor son plenamente efectivas en la conducción de corriente. Con el aumento de la resistencia, hay también una disminución en la inductancia del conductor, a causa del hecho de que la redistribución de la corriente es siempre de una característica tal como para hacer el encadenamiento del flujo y, en consecuencia, la inductancia, menor que una distribución uniforme de corriente.-

##### 4.1.5.1.1 Espesor de la película y resistencia a frecuencias muy elevadas

A frecuencias tan elevadas en las que la relación de resistencias resulta grande, prácticamente toda la corriente transportada por el conductor está concentrada muy cerca de la superficie.-

En estas condiciones, la resistencia a la corriente alternada que ofrece el conductor es, aproximadamente, la misma que la resistencia a la C.C. de un conductor hueco que posea la misma forma externa que el conductor real, pero con espesor igual a:

$$e = e \cdot \frac{1}{2p} \cdot \sqrt{\frac{r \cdot 10^9}{m \cdot f}} = 5033 \cdot \sqrt{\frac{r}{m \cdot f}}$$

donde  $p$  está en  $[\Omega/\text{cm}^3]$ ,  $f$  en ciclos y el espesor  $e$  resulta en cm.-

Este espesor es una medida grosera de la penetración de la corriente, puesto que la densidad de la misma cae a un valor muy pequeño a una distancia igual a varios espesores de película. Para el cobre a  $20^\circ\text{C}$ , el espesor de la película es:

$$e = 6,62 \cdot \sqrt{f}$$

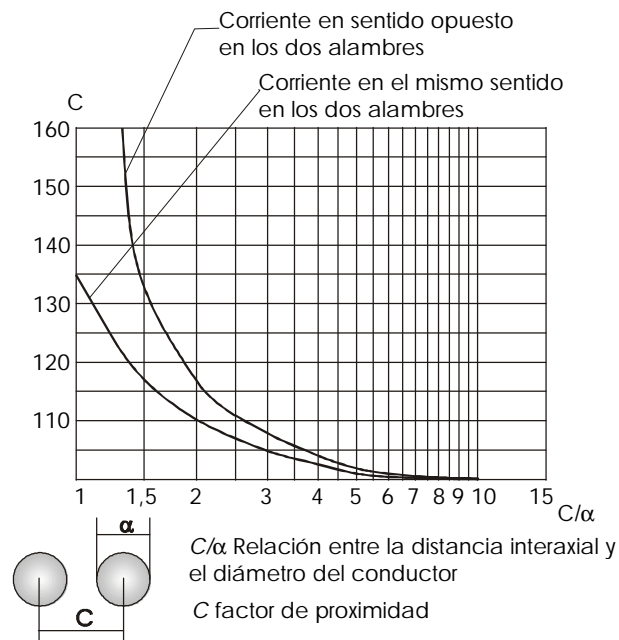
El espesor de la película para el cobre a distintas temperaturas se obtienen gráficamente de la Figura 4-6.-

**Figura 4-6. Espesor de la película y resistencia en alta frecuencia, para el cobre.**

El concepto de espesor de la película puede utilizarse para calcular la resistencia en radiofrecuencia de los conductores de cualquier forma o contorno, convenido que el espesor del conductor es en todas partes considerablemente mayor que el espesor de la película y siempre que el radio de curvatura de la superficie del conductor sea, del mismo modo, en todas partes apreciablemente mayor que el espesor de la película y no varíe muy rápidamente alrededor de la periferia. En estas condiciones, la resistencia en alta frecuencia de un conductor de cobre es:

$$\text{Resistencia a alta frecuencia} = \frac{261 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{f}}{P} \left[ \frac{\Omega}{\text{cm}} \right]$$

donde  $P$  es el perímetro en centímetro y  $f$  está en ciclos. Esta ecuación se ha trazado también en la Figura 4-6. La ecuación anterior se ajusta para valores de relación de resistencias que exceden a 2 y da resultados muy aproximados cuando la relación es del orden de 5 o más. Si el radio de curvatura varía muy rápidamente alrededor de la periferia, la resistencia a las corrientes alternadas es mayor que la expuesta, en un factor que depende del contorno o forma.-



**Figura 4-7. Factor de proximidad.**

Se notará que cuando dicha ecuación es válida, la resistencia a la corriente alternada es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia, e inversamente proporcional al tamaño del conductor o perímetro.-



Para el caso especial en que al conductor es una alambre circular o tubo se tiene que  $P=\pi \cdot d$ , donde  $d$  es el diámetro exterior en cm, entonces:

$$\text{Resistencia a alta frecuencia} = \frac{23,2 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{f}}{d} \left[ \frac{\Omega}{\text{cm}} \right]$$

DIAMETROS			SECCIÓN mm <sup>2</sup>	PESO gr/m.	LONGITUD m/kg.	RESISTENCIA W/m a 20°C	AUMENTOS DE ESPESOR		
A.W.G	B.A.S.	mm.					Esmaltado	Esmaltado forrado 1 capa algodón	Desnudo forrado 2 capas algodón
47	44	0.05	0.00100	0.0175	67140	0.91	0.01	—	—
46	42	0.06	0.00200	0.0250	59080	0.10	0.01	—	—
45	41	0.06	0.00500	0.0345	20160	0.55	0.01	—	—
44	40	0.07	0.00500	0.0400	28323	1.48	0.01	—	—
43	29	0.09	0.00636	0.0587	17637	270	0.01	—	—
42	38	0.10	0.00785	0.0700	14286	283	0.012	0.142	0.25
41	37	0.11	0.0095	0.0645	11395	1.67	0.013	0.143	0.25
40	—	0.12	0.0113	0.101	10.021	1.55	0.014	0.144	0.25
39	50	0.13	0.0133	0.119	5376	1.26	0.015	0.141	0.25
—	35	0.14	0.0154	0.137	7289	1.137	0.016	0.148	0.25
38	—	0.15	0.0177	0.157	6349	0.990	0.016	0.143	0.25
—	34	0.16	0.0201	0.170	5580	0.870	0.017	0.147	0.26
37	33	0.18	0.0254	0.227	4409	0.480	0.016	0.148	0.25
36	32	0.20	0.0314	0.200	3571	0.557	0.020	0.150	0.26
35	31	0.22	0.0380	0.339	2952	0.400	0.022	0.152	0.25
33	30	0.25	0.0491	0.437	2286	0.356	0.024	0.154	0.25
32	29	0.28	0.616	0.549	1822	0.284	0.026	0.156	0.25
31	—	0.30	0.0701	0.050	1587	0.248	0.020	0.058	0.25
—	28	0.32	0.0804	0.717	1395	0.218	0.029	0.159	0.25
29	27	0.35	0.0962	0.887	1160	0.122	0.030	0.160	0.25
28	—	0.34	0.1134	1.011	922.3	0.154	0.031	0.161	0.25
27	26	0.40	0.1257	1.123	802.9	0.139	0.132	0.162	0.25
26	25	0.45	0.1590	1.417	705.5	0.110	0.034	0.164	0.25
25	24	0.50	0.1963	1.750	571.4	0.0611	0.038	0.168	0.25
24	25	0.55	0.2376	2.118	472.5	0.0737	0.0040	0.170	0.25
23	—	0.60	0.2827	2.520	356.8	0.0618	0.042	0.172	0.25
—	22	0.65	0.3312	2.987	338.1	0.0527	0.044	0.174	0.25
22	21	0.70	0.3848	3.430	291.8	0.0451	0.042	0.176	0.25
—	—	0.75	0.4418	3.937	254.0	0.0398	0.048	0.178	0.25
21	20	0.80	0.5027	4.480	223.2	0.0349	0.050	0.180	0.25
20	19	0.90	0.6362	5.670	176.5	0.0275	0.054	0.194	0.25
—	—	0.95	0.7086	6.317	158.4	0.0247	0.050	0.186	0.25
18	16	1.00	0.7854	7.000	142.9	0.0223	0.058	0.188	0.25
—	—	1.05	0.8659	7.717	129.6	0.0202	0.060	0.190	0.25
—	—	1.10	0.9503	8.470	118.1	0.0184	0.060	0.190	0.25
—	17	1.15	1.0367	9.257	108.0	0.0165	0.060	0.190	0.25
18	—	1.20	1.1310	10.030	99.21	0.01547	0.060	0.190	0.25
—	—	1.25	1.2272	10.937	91.43	0.01426	0.065	0.195	0.25
—	16	1.30	1.3273	11.630	84.53	0.01318	0.065	0.195	0.25
—	—	1.35	1.4314	12.757	78.39	0.01223	0.065	0.195	0.25
17	—	1.40	1.5394	13.720	72.89	0.01137	0.065	0.195	0.25
—	15	1.45	1.6513	14.696	68.05	0.01045	0.065	0.195	0.25
—	—	1.50	1.7671	15.750	63.49	0.00990	0.065	0.195	0.25
16	14	1.00	2.0116	17.92	55.80	0.00870	0.070	0.200	0.25
—	—	1.70	2.2398	20.23	49.43	0.00771	0.070	0.200	0.25
15	13	1.80	2.5447	22.68	44.09	0.00687	0.075	0.200	0.25
—	—	1.93	2.8353	23.27	39.57	0.00617	0.076	0.201	0.25
14	12	2.00	3.1416	28.00	36.71	0.00587	0.080	0.201	0.25
—	—	2.10	3.4036	30.67	32.39	0.00503	0.080	0.210	0.29
—	—	2.20	3.8013	33.88	29.82	0.00460	0.083	0.220	0.29
—	11	2.30	4.1548	37.01	27.01	0.00421	0.085	0.233	0.29
13	—	2.40	4.5239	40.32	24.80	0.00386	0.090	0.240	0.29
—	—	2.56	4.9087	43.78	22.85	0.00356	0.090	0.240	0.29
—	10	2.60	5.3093	47.32	21.13	0.00329	0.095	0.246	0.29
12	—	2.70	5.7256	51.01	19.50	0.00305	0.095	0.245	0.29
—	—	2.80	4.1580	54.68	18.22	0.00234	0.100	0.250	0.29
—	9	2.90	6.6052	58.87	16.99	0.00264	0.105	0.25	0.29
11	—	3.00	7.0686	63.00	15.87	0.00247	0.110	0.26	0.29
—	—	3.10	7.5478	67.27	14.86	0.00231	—	—	0.29
10	8	3.20	8.0423	71.63	15.85	0.00217	—	—	0.29
—	—	3.30	8.553	78.23	13.12	0.00208	—	—	0.29
—	—	3.40	9.079	88.92	12.36	0.03193	—	—	0.29
—	—	3.50	9.821	85.76	11.68	0.001818	—	—	—
9	—	3.60	10.179	90.72	11.02	0.001719	—	—	—
—	7	3.70	10.752	95.83	10.43	0.001823	—	—	—
—	—	3.80	11.341	101.08	9.87	0.001543	—	—	—
—	—	3.90	11.940	106.47	9.39	0.001485	—	—	—
—	—	4.00	12.560	112.00	8.92	0.001393	—	—	—
—	6	4.20	15.854	123.48	8.10	0.001263	—	—	—
7	—	4.50	15.904	141.76	7.05	0.001100	—	—	—
—	—	4.80	18.096	161.28	6.80	0.000967	—	—	—
6	4	5.00	19.635	176.00	5.71	0.000891	—	—	—

Tabla 4-2. Tabla de valores para alambre de cobre.

#### 4.1.5.2 Efecto de proximidad

Cuando dos o más conductores adyacentes conducen corriente, la distribución de la misma en uno de los conductores, está afectada por el flujo magnético producido por los conductores adyacentes así como también por el flujo magnético que produce la corriente del mismo conductor.-

Este efecto se denomina efecto de proximidad y, ordinariamente, hace que la relación de resistencia sea mayor que para el caso de efecto pelicular simple. El efecto de proximidad es muy importante en las bobinas de radiofrecuencia y, en otros casos, es algunas veces simplemente un factor. Las fórmulas que se han desarrollado para el cálculo preciso del efecto de proximidad, sólo sirven para casos muy simples. En la Figura 4-7 se da el factor **C** de aumento de la resistencia del conductor por el efecto de proximidad para una línea de dos alambres circulares o tubulares y operando a frecuencias tan elevadas de modo que el espesor de la película sea pequeño.-

#### 4.1.5.3 Hilo de Litz

Las relaciones de resistencia de un conductor pueden hacerse muy próxima a la unidad, por lo menos para las RF más bajas, usando un conductor compuesto de un gran número de conductores de alambres finos que están aislados entre sí, excepto en los extremos, donde los distintos alambres se conectan en paralelo. Tal conductor recibe el nombre de **Hilo** o **Alambre de Litz** o **Litzendraht**. Está constituido por un cierto número de hilos delgados de cobre esmaltados y retorcidos. Aislando los conductores entre sí, se obliga a la corriente RF a circular por todos ellos. Para obtener este resultado es necesario, sin embargo, que a intervalos regulares los hilos internos del haz pasen al exterior y viceversa.-

Se obtiene con este procedimiento un aumento de la superficie externa del conductor y, por consiguiente, una disminución de las pérdidas a RF por efecto pelicular.-

La resistencia a RF de un hilo de Litz depende: de la sección del conductor (suma de la secciones de los hilos que lo componen); del diámetro (siempre inferior a 0,1mm) y del número de hilos; de la frecuencia y del factor de relleno (relación entre la sección del metal y la sección total de los conductores, comprendido el aislamiento).-

Para que un conductor de Litz sea efectivo, los distintos conductores deben estar trenzados o transpuestos, de manera tal que cada uno de ellos ocupe en el cable todas las posiciones posibles aproximadamente en la misma extensión. De esta manera el total de las líneas de flujo o circuitos magnéticos que rodean los distintos conductores individuales del cable, cuando se suman en una apreciable longitud, será prácticamente el mismo para todos los conductores aunque en un punto; los conductores individuales cercanos a la parte central están abrazados por un flujo mayor que los de cerca de la superficie en ese mismo punto; el resultado de esta compensación del encadenamiento del flujo, y en consecuencia de las reactancias de los conductores individuales, hace que la corriente se divida uniformemente entre ellos.-

## 5 CAPÍTULO V

### 5.1 Resistores

Un resistor ideal es un elemento de circuito de dos terminales, que se caracteriza porque la tensión instantánea entre las terminales es directamente proporcional a la corriente que circula por el mismo.-

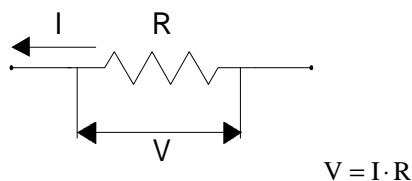


Figura 5-1. Resistor y Ley de Ohm.

La constante de proporcionalidad **R** es la resistencia del elemento y su unidad dimensional es el **Ohm** [ $\Omega$ ].-

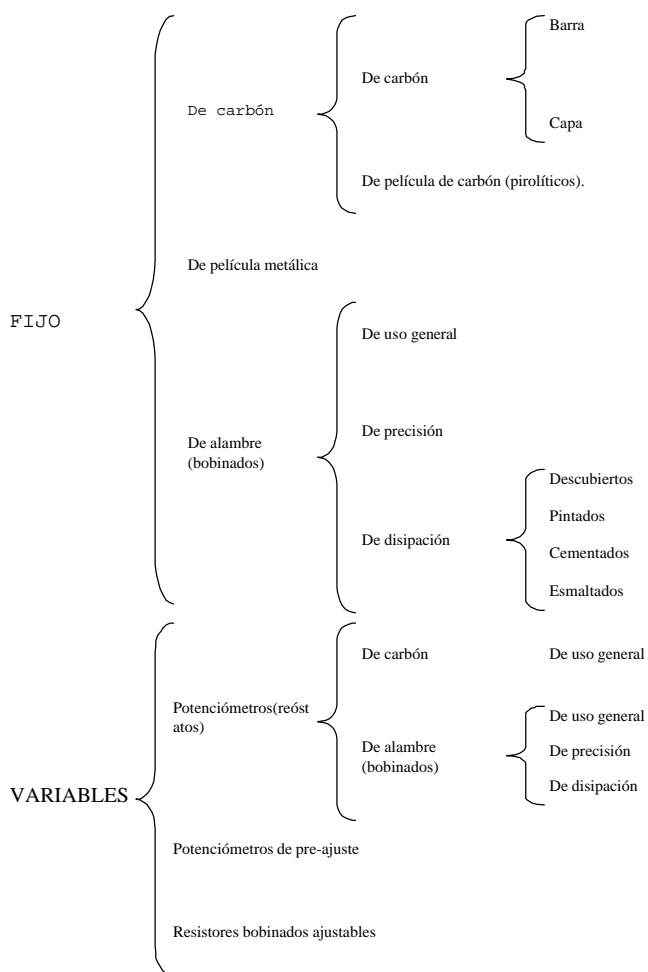


Figura 5-2. Clasificación general de resistores.

Según su utilidad, tolerancia, valor, potencia, etc. se los construye de distintos tipos, a saber:

- De composición
- Pirolíticos
- De depósito metálico
- Bobinados
- De película de carbón
- De plástico conductor
- De esmalte conductor

a su vez las de composición pueden ser moldeadas o prensadas, y las bobinadas pueden ser pintadas, vitrificadas o de precisión.-

### 5.1.1 Clasificación

#### 5.1.1.1 Resistores fijos

##### 5.1.1.1.1 Valor y Tolerancia

Existen resistores comerciales desde pocos  $\Omega$  hasta  $10M\Omega$  e incluso  $22M\Omega$  (no se aconseja resistores mayores a  $2,2M\Omega$ ). El valor se encuentra indicado en el cuerpo con números impresos o colores.-

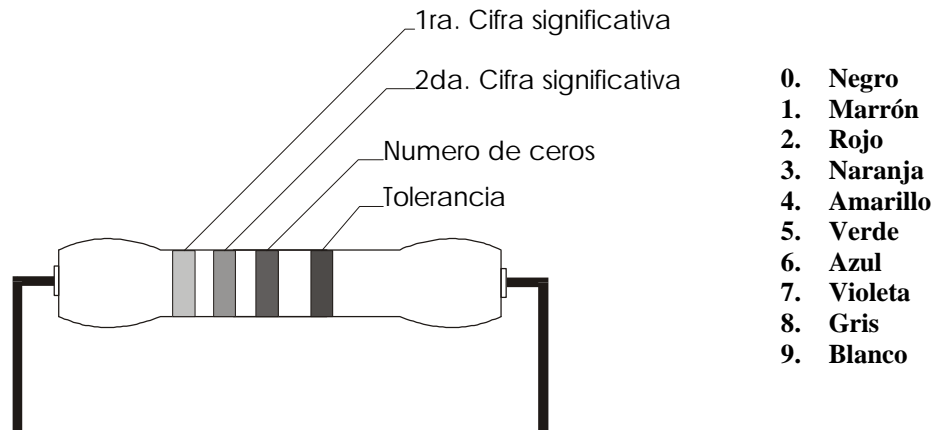


Figura 5-3. Código de colores de los resistores.

La magnitud del valor de un resistor depende del tipo de proceso de construcción. La exactitud se expresa como tolerancia es decir los límites máximos y mínimos dentro de los cuales se encuentra el resistor al salir de fabrica y se expresa en tanto % del valor nominal.-

Tipo	Tolerancias		
De composición	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$
Pirolíticos	$\pm 5\%$	$\pm 2\%$	$\pm 1\%$
Deposito metálico	$\pm 1\%$	$\pm 5\%$ (bajo pedido)	$\pm 2\%$ (bajo pedido)
Bobinados pintados	$\pm 5\%$	$\pm 1\%$	
Bobinados vitrificados	$\pm 5\%$	$\pm 1\%$	
Bobinados de precisión	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,01\%$	

Tabla 5-1. Tolerancias de algunos resistores.

##### 5.1.1.1.2 Valores Normalizados (o preferidos)

Los valores se normalizan:

- Para simplificar la fabricación y stock.
- Para poder utilizar todos los resistores fabricados.

Tolerancias	Valores resistivos																								
20%	10	-	-	-	15	-	-	-	22	-	-	-	33	-	-	-	47	-	-	-	68	-	-	-	100
10%	10	-	12	-	15	-	18	-	22	-	27	-	33	-	39	-	47	-	56	-	68	-	82	-	100
5%	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91	100

Tabla 5-2. Valores resistivos nominales comerciales según tolerancias.

##### 5.1.1.1.3 Tamaño y Disipación

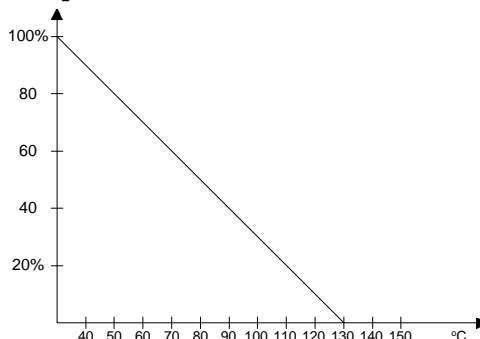
Como consecuencia de la corriente circulante se disipa energía bajo la forma de calor, la máxima energía disipada esta relacionada directamente con el tamaño del resistor.-

Se construyen resistores para diversos valores de disipación máxima.-

<i>Tipo</i>	<i>Potencia</i>							<i>Unidad</i>
De composición	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	5	W
Pirolíticos	1/8	1/4	1/2	1	2			W
Bobinados	5	10	20	50	400			W

**Tabla 5-3. Valores nominales de potencia según construcción.**

A fin de lograr una buena estabilidad se debe evitar superar el 70% de la máxima en los usos corrientes y el 50% en los casos de alta estabilidad.-



**Figura 5-4. Temperatura admisible según porcentaje de carga.**

Normalmente se pueden usar a máxima potencia de disipación hasta 40°C; en algunos casos hasta 70°C.-

Los fabricantes suelen facilitar gráficos que relacionan la temperatura ambiente con la carga máxima (Figura 5-4).-

#### 5.1.1.1.4 Estabilidad

La estabilidad se define generalmente como la variación en tanto % de la resistencia, después de un determinado número de horas de funcionamiento (por ej. 5000hs) a 20°C y 60% de humedad y cargado a su potencia nominal.-

Estas variaciones están referidas al valor original de la resistencia.-

<i>Tipo</i>	<i>Variación</i>
De composición	25%
Pirolíticos	2%
Bobinados	1%

**Tabla 5-4. Estabilidad de resistores.**

Se habla en estos casos de clases

- Clase 1 → (1%)
- Clase 5 → (5%)
- Clase 0,5 → (0.5% de estabilidad)

#### 5.1.1.1.5 Temperatura Máxima de trabajo

<i>Tipo</i>	<i>Temperatura máxima</i>
De composición <sup>35</sup>	100°C
Pirolíticos	150°C
Bobinados pintados	130°C-150°C
Bobinados vitrificados	300°C-400°C

**Tabla 5-5. Temperaturas máximas de trabajo.**

#### 5.1.1.1.6 Coeficiente de temperatura

Cambios de valor que experimentan los resistores con las variaciones de temperatura.-

<sup>35</sup> Los aglomerantes pueden alterarse a temperaturas superiores.

<i>Tipo</i>	<i>Coeficiente de temperatura</i>
De composición	$\pm 0,12\%/^{\circ}\text{C}$
Pirolíticos	$-0,02\%$ a $-0,2\%/^{\circ}\text{C}$
Bobinados pintados	$\pm 0,02\%/^{\circ}\text{C}$

Tabla 5-6. Coeficientes de variación de resistencia según temperatura de trabajo.

#### 5.1.1.1.7 Tensión máxima de trabajo

Es como su nombre lo indica la máxima tensión que debe aplicarse a un resistor si se quieren evitar posibles arcos, entre ranuras, entre gránulos etc..-

<i>Tipo</i>	<i>Tensiones</i>					
	<1/8W	1/8W	1/4W	1/2W	1W	2W
De carbón	70V	150V	200V	300V	350V	500V

Tabla 5-7. Tensiones máximas según potencias.

#### 5.1.1.1.8 Coeficiente de tensión

Se llama **Coeficiente de Tensión** a la variación de resistencia por voltio aplicado se expresa en tanto % de variación por voltio [%/V] o en partes por millón por voltios [PPM/V].-

<i>Tipo</i>	<i>Coeficiente de tensión</i>
De composición	$<0,05\%/V$
Pirolíticos	$<<0,05$ y $>>0,005\%/V$
Capa metálica	$>0,005\%/V$
Bobinados	$0\%/V$

Tabla 5-8. Coeficiente de tensión para distintos tipos de resistores.

#### 5.1.1.1.9 Ruido

##### 5.1.1.1.9.1 Ruido de corriente (Ruido Berramont)

<i>Tipo</i>	<i>Ruido</i>
De composición	5 a $20\text{mV}/V$
Pirolíticos	$<1\text{mV}/V$
Capa metálica	$<0,1\text{mV}/V$
Bobinados	$<0,1\text{mV}/V$

Tabla 5-9. Ruido de corriente generado por cada tipo de resistor.

##### 5.1.1.1.9.2 Ruido Térmico (Ruido de Johnson)

La tensión generada por el ruido térmico o ruido de Johnson esta dado por la ecuación:

$$E^2 = 4K \cdot R \cdot T \cdot \Delta f$$

La sumatoria de ambos ruidos se grafican a continuación distintos valores de potencias.-

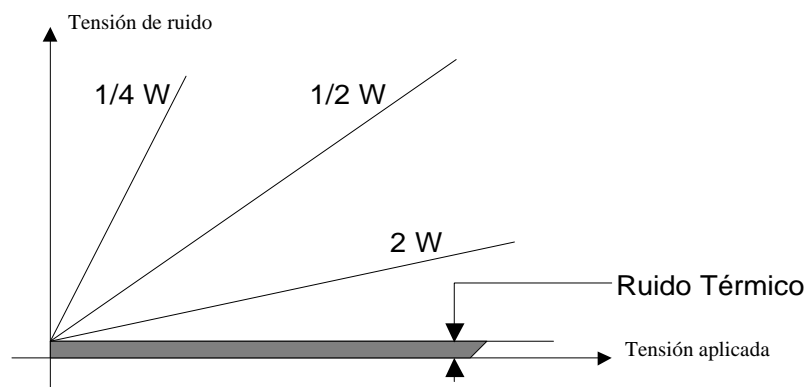


Figura 5-5. Tensión total de ruidos.

#### 5.1.1.1.10 Estabilidad durante el almacenamiento (1 año)

Tipo	Estabilidad
De composición	5%
Pirolíticos	0,5%
Capa metálica	0,1%

Tabla 5-10. Variaciones de resistencia en 1 año de almacenamiento.

#### 5.1.1.2 Resistores Variables

Los resistores variables se llaman comúnmente **potenciómetros** cuando están colocados en paralelo en el circuito y **reóstatos** cuando están colocados en serie.-

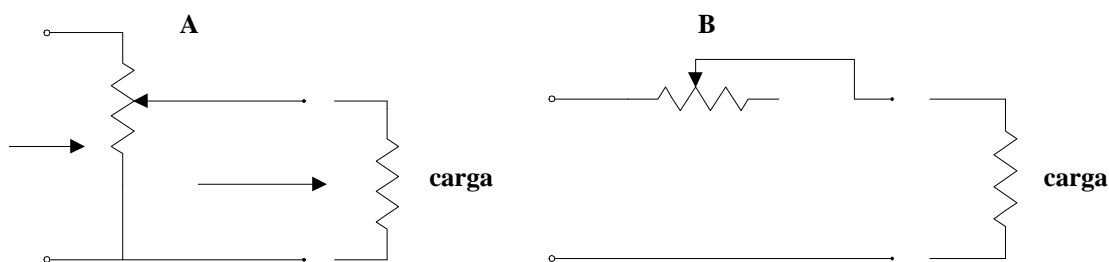


Figura 5-6. A) potenciómetro. B) Reóstato.

Normalmente consta de una base aislante de forma circular sobre la que está la resistencia unida a los dos terminales extremos del potenciómetro; en el centro se halla un cursor o contacto móvil comandado por un eje; este cursor se halla conectado eléctricamente a un terminal intermedio y aislado eléctricamente del eje; el eje gira sobre un cojinete fileteado exteriormente para permitir la fijación del potenciómetro al soporte en el cual va a ir montado.-

Según su construcción pueden clasificarse en:

- Resistencias variables bobinadas
- Resistencias variables no bobinadas
  - De película de carbón (carbón depositado)
  - De pista de composición (moldeadas prensadas)
  - De plástico conductor
  - De esmalte conductor
  - De película metálica

### 5.1.1.2.1 Características

Tipo	Valores		Tolerancia	Estabilidad	Pot.	Coef. de temp.	Resistencia efectiva
	Desde	Hasta					
De carbón lineales	10 $\Omega$	4M $\Omega$			2,5W	$\pm 200\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$	<5% del valor nominal
De carbón no lineales	1K $\Omega$	2,2M $\Omega$			1W	$\pm 200\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$	
De carbón (uso gral.)			$\pm 20\%$	Capa $\pm 20\%$ Prensados $\pm 5\%$		$\pm 200\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$	
Bobinados (uso gral.)	1 $\Omega$	500K $\Omega$	$\pm 10\%$	$\pm 2\%$	10W-1KW	$\pm 50\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$	
De precisión			$\pm 10\%-\pm 5\%$	$\pm 0,5\%$			
De composición							<3% del valor nominal

Tabla 5-11. Valores típicos de algunos tipos de resistores.

- **Ley de variación**

Expresa el cambio de resistencia con el movimiento del contacto deslizante. Según la ley de variación pueden clasificarse en

- **Lineales**
- **Logarítmicos**
- **Senoidales**
- **Exponenciales**

- **Linealidad**

Relación entre desplazamiento del vástago y variaciones de resistencias.

Para ensayar esta variación se dispone en tandem el resistor a medir con un resistor patrón, y se comparan las variaciones con un indicador diferencial de cero.

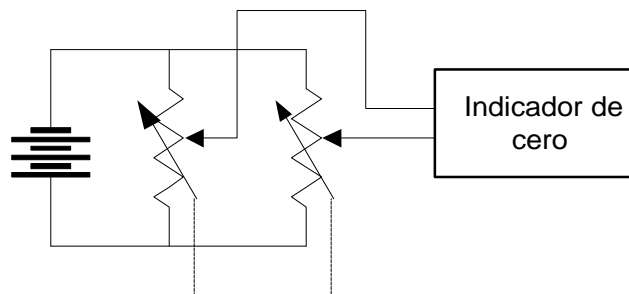


Figura 5-7. Dispositivo para medir la linealidad de resistores.

- **Resistencias de aislamiento (Rigidez dieléctrica)**

$R_a > 1000\text{M}\Omega$  entre elemento resistivo y la parte metálica, el ensayo se realiza a 500V.

Se realiza también un ensayo a 1500V entre elemento resistivo (circuito potenciométrico) e interruptor.

- **Ángulo efectivo de Rotación**

El ángulo de rotación va desde  $235^{\circ}$  a  $325^{\circ}$ , o sea, tienen una zona muerta de 10 a 30%.

- **Par de accionamiento**

Es la fuerza necesaria para hacer girar el eje partiendo de reposo. Valores típicos pueden ser:

- De carbón  $\rightarrow$  <500gr/cm
- Bobinados  $\rightarrow$  <800gr/cm

Para casos especiales pueden ser muchos menores. También se define un par extremo de 7 a 12 Kg/cm.

- **Vida Útil**

Como mínimo 20.000 maniobras (a razón de 1.000 maniobras por hora).

- **Pruebas higroscópicas**

Después de 24 horas en ambiente húmedo no debe variar en más de un  $\pm 20\%$ .

- **Ruido**

Además de los ruidos típicos de las resistencias fijas (Ruido Térmico y Ruido de Corriente) se tienen estos casos:



- **Ruido de Contacto** (Debido a variaciones en la superficie de contacto o suciedades).
- **Ruido de Resolución.**
- **Ruido de Vibración.**



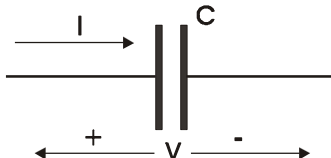
## 6 CAPÍTULO VI

### 6.1 Capacitores

Un capacitor ideal es un elemento de circuito de dos terminales, que se caracteriza porque la corriente a través del elemento es proporcional a la velocidad de variación de la tensión en sus terminales.-

$$i = C \frac{\partial V}{\partial t}$$

La constante de proporcionalidad **C** es la capacitancia del elemento. La unidad dimensional de capacitancia es el **Faradio [F]**.-



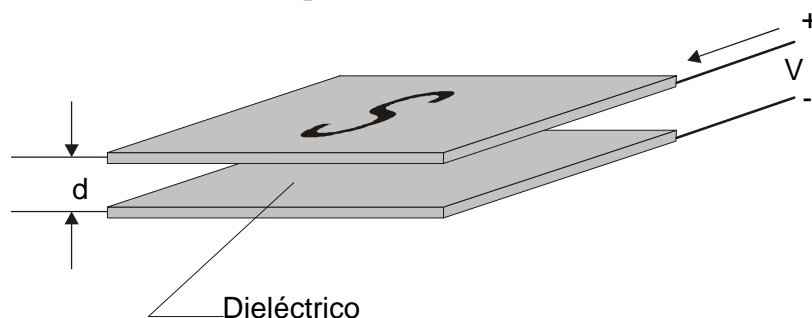
**Figura 6-1 Símbolo de un capacitor.**

Un capacitor ideal es un dispositivo libre de pérdidas (por lo tanto no disipa energía), por el contrario es capaz de almacenar energía eléctrica. La energía almacenada en el campo eléctrico es:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

Para deducir una magnitud que define su performance como elemento de circuito, se parte de una configuración simplificada elemental (Figura 6-2).-

La misma consta de dos placas conductoras paralelas, separadas por una distancia **d**. El volumen que separa las placas está lleno de una sustancia no conductora, el dieléctrico, caracterizado por su constante dieléctrica **ε**. Dos terminales están conectados a las placas conductoras.-



**Figura 6-2. Esquema elemental de un capacitor.**

La capacidad de esta estructura es

$$C = \frac{e \cdot S}{d} = \frac{e_0 \cdot e_r \cdot S}{d}$$

#### 6.1.1 Clasificación

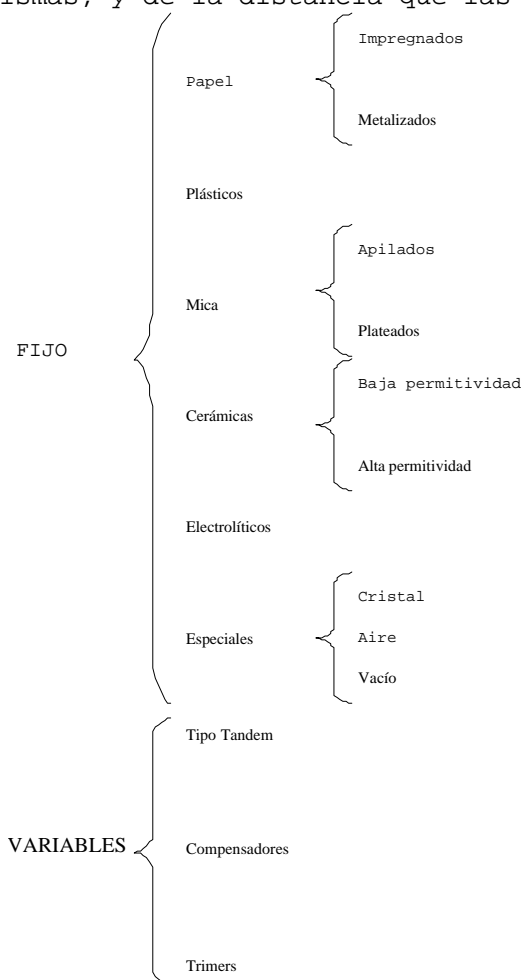
Según su categoría (fijos y variables) se los construye de distintos materiales y con distintas tecnologías, y pueden clasificarse como muestra la Figura 6-3.-

#### 6.1.2 Capacitores variables

Analizando la expresión de la capacidad:

$$C = \frac{e \cdot S}{d}$$

Se deduce que la capacidad de un capacitor es función de la constante dieléctrica del medio que separa las placas, de la superficie de enfrentamiento de las mismas, y de la distancia que las separa.-



**Figura 6-3. Clasificación de capacitores.**

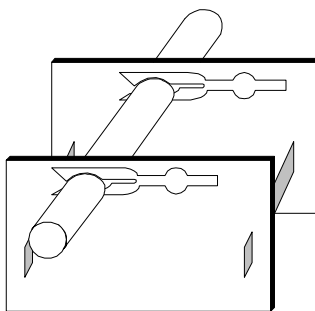
Cambiando o variando cualquiera de estas tres magnitudes, se varía la capacidad del capacitor. La posibilidad de variar la capacidad de un elemento, variando o la distancia que separa las placas, o la superficie de enfrentamiento de las mismas se aprovecha para construir capacitores variables. En la práctica estas variaciones se logran, o acercando o alejando las placas, o introduciendo un paquete de placas en el interior de otro.-

La solución de acercar o alejar las placas, se usa en los llamados **capacitores ajustables** (o **de pre-ajuste**. Por ejemplo: **trimmer padder**, **neutralizadores**, etc.). Estos son capacitores variables, pero las variaciones de capacidad se efectúan generalmente vía una herramienta (por ejemplo: un destornillador), y se utilizan cuando los ajustes o variaciones no son muy frecuentes.-

La solución de introducir un paquete de placas en el interior de otro se usa en capacitores ajustables de mejor calidad, y en general, en los llamados **capacitores variables**. Se suele reservar este nombre para aquellos capacitores en los cuales los ajustes pueden ser muy frecuentes, y para realizarlos no se necesitan herramientas, sino que se efectúan directamente con la mano. Ejemplos de los capacitores variables son los de sintonía (los corrientemente llamados **tandem** porque suelen agrupar a dos o más capacitores en un eje).-

Estos capacitores están formados, en general, por un paquete de placas fijas y un paquete de placas móviles fijadas a un eje. El paquete de placas

fijas se llama estator, y el de placas móviles, rotor. Girando el eje se introduce el rotor en el estator, aumentando la superficie de enfrentamiento de placas, con el consiguiente aumento de capacidad del capacitor.-



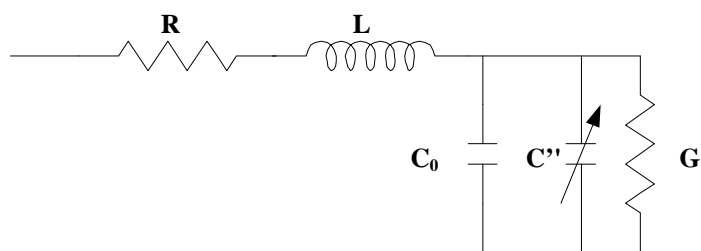
**Figura 6-4. Capacitor variable**

De lo anterior se deduce que la capacidad de los capacitores variables es función del ángulo de giro.-

Las chapas del estator y del rotor suelen ser de aluminio, y estas últimas son a veces ranuradas para permitir pequeños ajustes en la curva de capacidad-ángulo de giro.-

El rotor suele girar sobre cojinetes a bolillas, y es éste el que está eléctricamente conectado a la estructura exterior del capacitor; el contacto eléctrico se asegura por medio de horquillas que cortocircuitan el cojinete a bolillas evitando contactos imperfectos. La conexión del circuito asociado conviene hacerlo en las horquillas. El dieléctrico en general es el aire (excepto algunos casos particulares).-

El circuito equivalente de un capacitor variable es el siguiente:



$$C = C_0 + C'$$

**Figura 6-5. Circuito equivalente de un capacitor variable.**

en el cual:

**C<sub>0</sub>**: Capacidad mínima o residual; siempre distinta de cero.

**C'**: Capacidad que hay que sumar a **C<sub>0</sub>** para tener la capacidad total del capacitor.

**G**: Conductancia debida, fundamentalmente a las pérdidas.

**R**: Resistencia equivalente a la resistencia en serie de las conexiones ejes, soportes, contactos rozantes, etc..

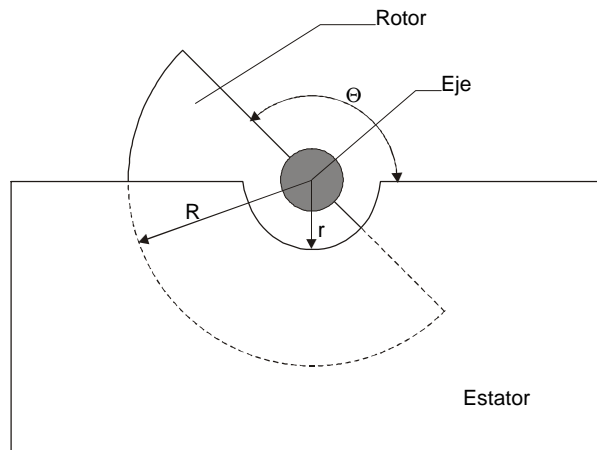
**L**: Inductancia equivalente, debido a los efectos magnéticos de las corriente que circulan por el capacitor y sus conexiones.

El esquema simplificado de un capacitor variable puede plantearse según muestra la Figura 6-6 donde **R** es el radio de las placas móviles, y puede ser constante o no, y **r** es el radio del corte de las placas fijas, y también puede ser constante o no.-

Se ha dicho que en estos capacitores, la capacidad es función del ángulo de giro y la ley de variación de la capacidad en función del ángulo de giro puede presentar varias características, las que se verán más adelante. Por ahora puede decirse que, variando con una determinada ley, o el perfil de las placas móviles, o el perfil del corte del rotor o ambos a la vez, pueden obtenerse distintas leyes de variación de la capacidad en función del ángulo de giro.-

A continuación se analiza un método para obtener el perfil de las placas o del corte, partiendo de una determinada ley de variación de la capacidad.-

Cuando el ángulo  $\theta$  varía, también varía la superficie enfrentada, y por lo tanto varía la capacidad.-



**Figura 6-6. Esquema simplificado de un capacitor variable.**

A una variación  $d\theta$  ( $\theta$  en radianes) corresponde una variación de capacidad  $dC$  igual a:

$$K \cdot dC = \frac{1}{2} \cdot (R^2 - r^2) \cdot d\theta$$

$K$  es un factor de proporcionalidad entre capacidad y la superficie y su determinación se hará más adelante.-

Si el ángulo  $\theta$  se lo expresa en grados sexagesimales, se obtiene:

$$\text{Ec. 6-1} \quad K \cdot dC = \frac{1}{114,6} \cdot (R^2 - r^2) \cdot d\theta$$

o bien:

$$\text{Ec. 6-2} \quad \frac{dC}{d\theta} = \frac{1}{114,6 \cdot K} \cdot (R^2 - r^2)$$

Suponiendo que la variación deseada, en función del ángulo de giro sea:

$$C = j(\theta)$$

se deriva esta expresión:

$$\text{Ec. 6-3} \quad \frac{\partial C}{\partial \theta} = j'(\theta)$$

y reemplazando la Ec. 6-3 en la Ec. 6-2 se obtiene:

$$\frac{dC}{d\theta} = \frac{1}{114,6 \cdot K} \cdot (R^2 - r^2) = j'(\theta)$$

Analizando esta expresión se ve que el perfil de las chapas, o del corte, queda determinado (en coordenadas polares), si se puede calcular el valor de la derivada, de la función  $j'(\theta)$  con respecto a  $\theta$ , pues puede despejarse  $R$  o  $r$  (si se despeja  $R$  hay que considerar a  $r$  como constante, y viceversa).-

$$\text{Ec. 6-4} \quad R = \sqrt{(114,6 \cdot K \cdot j'(\theta) + r^2)}$$

$$\text{Ec. 6-5} \quad r = \sqrt{(114,6 \cdot K \cdot j'(q) + R^2)}$$

Estas son las expresiones del perfil de las chapas o del perfil del corte (en función de  $\theta$ ), que permiten obtener la variación deseada:  $C = \varphi(\theta)$ .-

Quedaría por determinar el significado de la constante  $K$ . Para ello se integra la Ec. 6-1.-

$$dC = \frac{1}{114,6 \cdot K} \cdot (R^2 - r^2) = dq$$

entre  $C_{\text{máx}}$  y  $C_{\text{residual}}$

$$C_{\text{máx}} - C_{\text{residual}} = \frac{1}{K} \cdot \left( \underbrace{\frac{1}{114,6 \cdot K} \cdot \int_0^{180} (R^2 \cdot dq)}_a - \underbrace{\frac{1}{114,6 \cdot K} \cdot \int_0^{180} (r^2 \cdot dq)}_b \right)$$

**a** = área de una lámina del rotor ( $A_R$ ).

**b** = área del corte del estator ( $A_r$ ).

Luego:

$$K = \frac{A_R - A_r}{C_{\text{máx}} - C_{\text{residual}}}$$

o sea que  $K$  es la superficie de enfrentamiento por unidad de capacidad.-

#### 6.1.2.1 Ejemplos prácticos

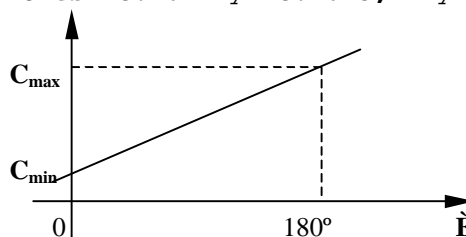
- A)** Se desea tener capacitor con una variación lineal de capacidad. (En inglés **SLC** - Straight line Condensor).

$$C = b + a \cdot q$$

Analizando la Figura 6-7 se obtiene;

$$C = C_{\text{min}} + \frac{C_{\text{máx}} - C_{\text{min}}}{180^\circ} \cdot q = j(q)$$

La derivada de esta expresión es una constante, por lo tanto, de acuerdo a las expresiones Ec. 6-4 y Ec. 6-5,  $R$  y  $r$  son constantes.-



**Figura 6-7. Respuesta de un SLC.**

Estos capacitores se denominan de variación lineal de capacidad, o de capacidad en línea recta, y tienen las chapas del rotor y el corte del estator de forma semicircular.

- B)** Se desea tener un capacitor que permite obtener (en un circuito resonante) una variación lineal de frecuencia en función del ángulo de rotación (frecuencia en línea recta). (En inglés **SIF** - Straight Line Frequency).-

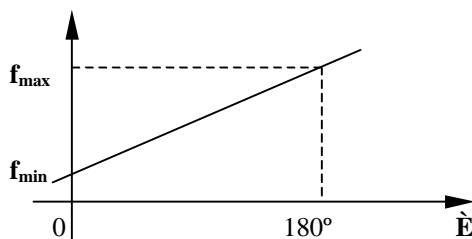


Figura 6-8. Respuesta de un SIF.

Analizando la Figura 6-8 se obtiene;

$$f = f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{180^\circ} \cdot q$$

dividiendo por  $f_{\min}$  y haciendo:

$$h = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}$$

Se tiene:

$$\frac{f}{f_{\min}} = 1 + \frac{h-1}{180^\circ} \cdot q$$

Recordando que en un circuito resonante:

$$f = \frac{1}{2 \cdot p \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

de donde se puede ver que la frecuencia  $f$  es función cuadrática de la capacidad  $C$ , o sea, en este caso será:

$$\frac{f}{f_{\min}} = \frac{\frac{1}{2 \cdot p \cdot \sqrt{L \cdot C_{\max}}}}{\frac{1}{2 \cdot p \cdot \sqrt{L \cdot C}}} = \sqrt{\frac{C_{\max}}{C}} \Rightarrow \left( \frac{f}{f_{\min}} \right)^2 = \frac{C_{\max}}{C}$$

luego:

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{1}{\left( 1 + \frac{h-1}{180^\circ} \cdot q \right)^2}$$

y

$$C = \frac{C_{\max}}{\left( 1 + \frac{h-1}{180^\circ} \cdot q \right)^2} = j(q)$$

Derivando esta expresión y reemplazándola en las Ec. 6-4 o Ec. 6-5 se obtiene el valor de  $R=f(\theta)$  o de  $r=f(\theta)$  para estos capacitores.

Otras leyes de variación usuales son: la llamada longitud de onda en línea recta (En inglés **SBW** - Straight line wave-length), que permite obtener, en un circuito resonante, una variación lineal de la longitud de onda, en función del ángulo de rotación, y las logarítmicas de capacidad o de frecuencia de resonancia de un circuito es una función lineal del ángulo de rotación.-

Los capacitores convencionales suelen seguir algunas de estas leyes o sino también, combinaciones de las mismas. Por ejemplo los capacitores de sintonía de radiorreceptores suelen seguir aproximadamente una ley de variación lineal de longitud de onda en la zona de las capacidades bajas, y



una ley de variación lineal de la frecuencia en la zona de las capacidades altas.-

La Figura 6-9 muestra algunas curvas de variación de capacitores variables comerciales.-

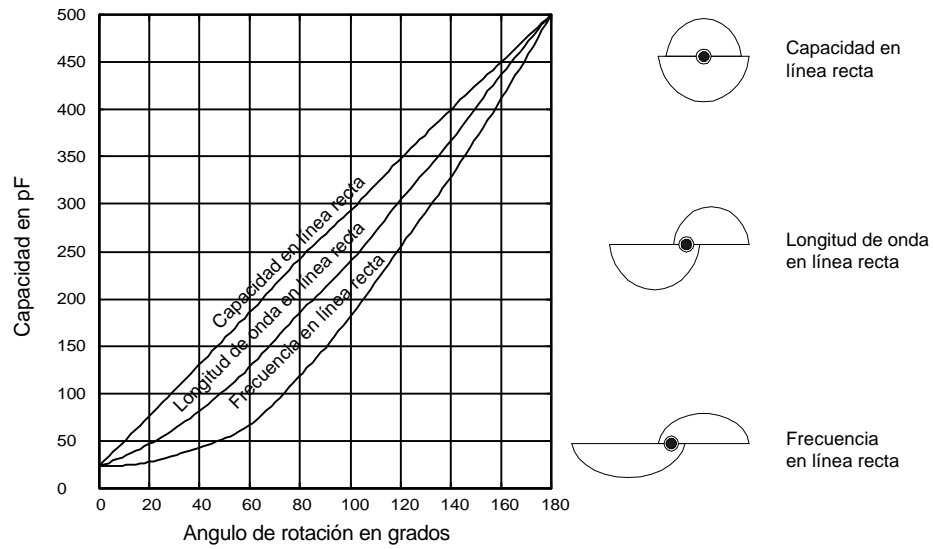


Figura 6-9. Características de algunos capacitores variables comerciales.



## 7 CAPÍTULO VII

### 7.1 Inductores

Un inductor ideal es un elemento pasivo, de dos terminales, que se caracteriza porque la tensión en los extremos es proporcional a la velocidad de variación de la corriente que circula por el mismo.-

$$V = L \cdot \frac{di}{dt}$$

La constante de proporcionalidad **L** es la inductancia del elemento.-

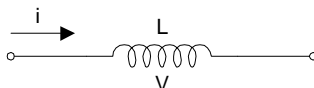


Figura 7-1. Símbolo de una bobina.

La inductancia es una propiedad de los elementos (o circuitos eléctricos) en virtud de la cual, los mismos se oponen a toda variación de corriente que los recorre.-

Una variación de corriente genera una **f.e.m.** inducida.-

**Ec. 7-1**       $e = -L \cdot \frac{di}{dt}$

El signo negativo indica que la **f.e.m.** inducida se opone a la **f.e.m.** que produce la variación de corriente.-

La **f.e.m.** inducida en un elemento puede deberse a una variación de corriente que circula por el mismo elemento (autoinducción) o una variación de corriente que circula por otro elemento (inducción mutua).-

El término inductancia (sin otro calificativo) se utiliza en relación al fenómeno de autoinducción.-

La unidad dimensional de la inductancia es el **Henrio**. Un elemento tiene una inductancia de un Henrio, cuando una variación de corriente de un amperio en un segundo, desarrolla en el mismo una **f.e.m.** de un voltio.-

Cualquier tramo de un circuito, aún una pequeña longitud de conductor, considerada como parte de un circuito cerrado, posee inductancia. En la práctica se concentran determinados valores de inductancia en elementos de circuitos, denominados inductores.-

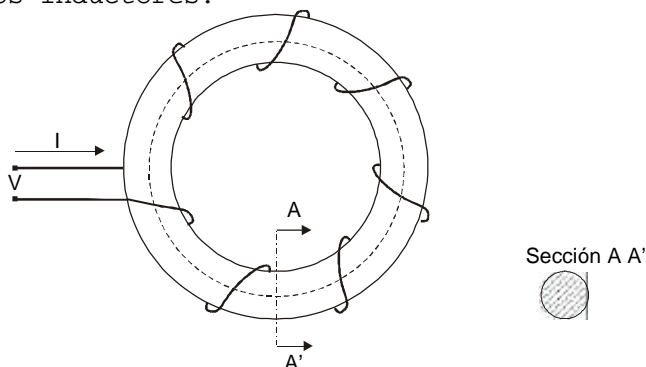


Figura 7-2. Bobina de núcleo toroidal.

El inductor ideal es un elemento libre de pérdidas y capaz de almacenar energía bajo forma de energía magnética.-

La energía almacenada en el campo magnético en Julios o vatios·segundos, es:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Los factores que determinan la inductancia de un inductor pueden obtenerse partiendo de un inductor elemental que conste de un núcleo toroidal de permeabilidad  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$  [H/m] de sección transversal  $S$  [m<sup>2</sup>] y longitud media  $\ell$  [m] sobre el que está uniformemente devanado un arrollamiento de  $N$  espiras (Figura 7-2).-

En estas condiciones, si por un conductor circula una corriente  $I$  se tiene un flujo:

$$f = B \cdot S = m \cdot H \cdot S \Rightarrow f = m \cdot \frac{N \cdot I}{\ell} \cdot S$$

y recordando que:

$$e = -N \cdot \frac{df}{dt}$$

se reemplaza, obteniéndose:

$$\text{Ec. 7-2} \quad e = -m \cdot \frac{N^2 \cdot S}{\ell} \cdot \frac{di}{dt}$$

Igualando la Ec. 7-1 y la Ec. 7-2:

$$L = m \cdot \frac{N^2 \cdot S}{\ell}$$

Esta relación puede ser escrita como:

$$L = m \cdot \frac{N^2}{\frac{1}{m} \cdot \frac{\ell}{S}} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$$

es decir que la inductancia de un inductor es proporcional al cuadrado del número de espiras, e inversamente proporcional a la reluctancia del circuito magnético. Es interesante rescatar que las características no lineales  $B-H$  de los materiales magnéticos hace, que cuando se usan estos materiales, el valor de la inductancia puede variar en función de la corriente circulante.-

En un inductor ideal, o en una inductancia pura, la corriente circulante estará desfasada 90° en atraso con respecto a la tensión aplicada.-

En los inductores reales, esta premisa no se cumple debido a las pérdidas de energía; pérdidas que fundamentalmente pueden dividirse en:

- **Pérdidas en el bobinado.**
  - Pérdidas debidas a la resistencia propia del bobinado.
  - Pérdidas debidas a corrientes parásitas en el bobinado.
  - Pérdidas debidas a las corrientes parásitas y fundamentalmente por conductancia \*\*\*\*\*
- **Pérdidas en el núcleo<sup>36</sup>.**
  - Pérdidas por corrientes parásitas.
  - Pérdidas por histéresis magnética.
  - Pérdidas residuales.

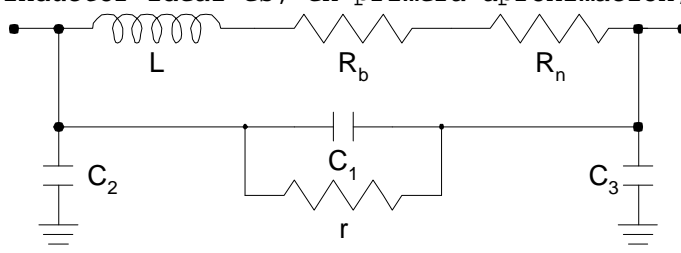
Las pérdidas residuales, se deben a causas no bien conocidas. Lo más probable es que en frecuencias muy altas tenga relación con las resonancias mecánicas de los imanes elementales del material del núcleo, y tienen relativa importancia con valores bajos de inducción, para las cuales las pérdidas residuales no pueden ser calculadas, pero se obtienen restando de las pérdidas totales medidas, las pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis.-

<sup>36</sup> En los inductores llamados con núcleo de aire no existen pérdidas en el núcleo.-

Además hay que tener en cuenta que cuando un inductor está blindado, la presencia del blindaje introduce pérdidas adicionales.-

En los esquemas equivalentes, se asocian a todo inductor, resistencias de pérdidas y capacitancias equivalentes a las capacitancias existentes entre las distintas espiras, entre éstas y tierra, etc..-

El esquema del inductor ideal es, en primera aproximación, el siguiente:



**Figura 7-3. Circuito equivalente de un inductor real.**

En el cual:

**L**: representa la inductancia del inductor.

**R<sub>b</sub>**: representa las pérdidas resistivas en el bobinado

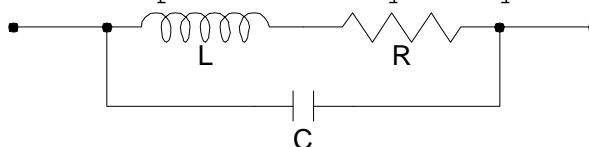
**R<sub>n</sub>**: representa las pérdidas en el núcleo.

**r**: representa las pérdidas en las capacitancias parásitas.

**C<sub>1</sub>**: representa las capacitancias entre espiras.

**C<sub>2</sub>** y **C<sub>3</sub>**: representa las capacitancias de espiras respecto al chasis (en realidad están repartidas a lo largo de las bobinas).

En general, se suele simplificar el esquema equivalente reduciéndolo a:



**Figura 7-4. Esquema equivalente reducido.**

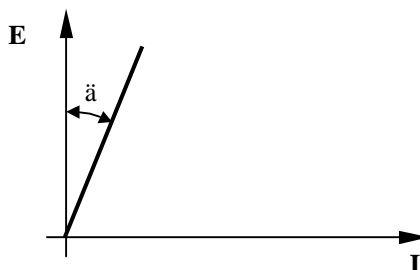
**R** y **C** se denominan parámetros residuales del inductor.-

De los esquemas equivalentes se deduce que, en la práctica un inductor es equivalente a un circuito resonante con su frecuencia propia de resonancia. Normalmente estos elementos se utilizan a frecuencias muchos menores de la mitad de dicha frecuencia.-

En un inductor, además del valor de la inductancia **L**, hay que tener en cuenta su capacidad distribuida que debe ser mínima, y factor de mérito **Q**, que debe ser elevado.-

$$Q = \frac{v \cdot L}{R} = \frac{1}{\operatorname{tg} d}$$

El factor de mérito (más constante, dentro de un determinado rango de frecuencia, que la resistencia **R**) caracteriza muy bien al comportamiento de un inductor.-



**Figura 7-5. Defasaje de corriente producido por una bobina real.**

Existe una gran variedad de tipos y formas de inductores. Una primera clasificación de los mismos puede hacerse teniendo en cuenta el material del núcleo; con este criterio, pueden clasificarse en:

- Inductores o bobinas con núcleo de aire.  
Los inductores o bobinas con núcleo de aire son aquellos en los que el núcleo es de aire, o eventualmente un material magnético, usado como soporte o aislante, y pueden a su vez clasificarse en:
  - Inductores de una sola capa (solenoides).
  - Inductores multicapas.
- Inductores con núcleo de materiales magnéticos.  
Los inductores con núcleo de material magnético son aquellos en los que el núcleo es de un material ferromagnético, y pueden a su vez clasificarse en:
  - Inductores con núcleo de hierro laminado.
  - Inductores con núcleo de hierro pulverizado, o de materiales magnético no conductores (Ferritas).

### 7.1.1 Inductores con núcleo de aire, de una sola capa (solenoides)

Es una configuración bastante generalizada en los circuitos electrónicos. Se caracterizan por la constancia del valor de su inductancia, sobre todo en función de la corriente, pues no hay elementos no lineales en el circuito, y se utilizan frecuentemente en frecuencia superiores a los 1000 y 1500KHz. Se tratan en general de bobinas de ejes rectos, construidas con alambres macizo, o en algunos casos con caño de cobre plateado, bobinadas en el aire (autosoportadas), o sobre formas del material aislante (porcelanas, estratificados, lusite, etc.) las que pueden tener aristas para disminuir los puntos de contacto, o también estar fileteadas para asegurar la estabilidad mecánica de las espiras, (en algunos casos especiales las espiras se obtienen depositando directamente sobre la forma fileteada el material conductor).

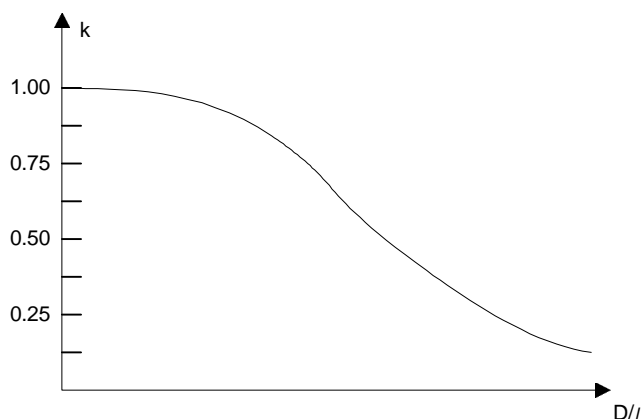


Figura 7-6. Factor de Nagaoka vs D/l.

Estos inductores de una capa pueden considerarse como bobinas toroidales de eje rectificado en los que debido a la rectificación hay que introducir un factor **k** (factor de **Nagaoka**) menor que la unidad, que depende de las dimensiones geométricas de la bobina y que se acostumbra a expresarlo en forma gráfica en función de la relación **D/l** (diámetro del solenoide por diámetro de la forma, dividido por el diámetro del conductor y la longitud del solenoide). La Figura 7-6 muestra una curva aproximada del factor de Nagaoka.-

La expresión del valor de la inductancia de un inductor es en este caso:

$$L = m \cdot k \cdot \frac{N^2 \cdot S}{\ell} [\text{H}, \text{m}]$$

pero como  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$  y siendo la permeabilidad del aire  $\mu_r = 1$  y en el sistema **M.K.S.**  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [\text{H/m}]$ , se tiene, expresando las magnitudes en centímetros [cm] y la inductancia en microhenrios [ $\mu\text{H}$ ]:

$$\text{Ec. 7-3} \quad L = 4 \cdot p \cdot k \cdot \frac{N^2 \cdot S}{\ell} \cdot 10^{-3} [\text{mH}, \text{cm}]$$

expresando  $S$  en función del radio  $R$  o del diámetro  $D$

$$L = p \cdot R^2 = \frac{p \cdot D^2}{4}$$

y reemplazando en la Ec. 7-3, se obtiene:

$$\text{Ec. 7-4} \quad L = \frac{4 \cdot p^2 \cdot N^2 \cdot R^2}{\ell} \cdot k \cdot 10^{-3} [\text{mH}, \text{cm}]$$

$$\text{Ec. 7-5} \quad L = \frac{p^2 \cdot N^2 \cdot D^2}{\ell} \cdot k \cdot 10^{-3} [\text{mH}, \text{cm}]$$

Reemplazando  $4 \cdot \pi^2$  por su valor  $4 \cdot \pi^2 = 39,48$  en la Ec. 7-4, se obtiene la llamada fórmula de **Nagaoka**:

$$L = 0,03948 \cdot \frac{N^2 \cdot R^2}{\ell} \cdot k [\text{mH}, \text{cm}]$$

#### **7.1.1.1 Otras expresiones simplificadas**

Si en la Ec. 7-4 se agrupan factores

$$L = \left( \frac{4 \cdot p^2 \cdot N^2 \cdot R}{\ell} \cdot k \right) \cdot R \cdot 10^{-3} [\text{mH}, \text{cm}]$$

y a la cantidad entre paréntesis se le reemplaza por  $J$  se obtiene la expresión:

$$\text{Ec. 7-6} \quad L = R \cdot N^2 \cdot J \cdot 10^{-3} [\text{mH}, \text{cm}]$$

El factor  $J$  se lo tabula en función de la relación  $l/D$  y para mayor facilidad, se lo representa en forma gráfica (Figura 7-7).-

En el caso de bobinas no demasiado cortas  $l > 0,8R$  puede utilizarse, con un error menor del 1%, la siguiente expresión de  $J$ :

$$J \cdot 10^{-3} = \frac{R}{23 \cdot R + 25 \cdot \ell}$$

que llevada a la Ec. 7-6 reproduce la fórmula de **Wheeler**

$$L = \frac{R^2 \cdot N^2}{23 \cdot R + 25 \cdot \ell} [\text{mH}, \text{cm}]$$

Las expresiones anteriores son útiles para calcular la inductancia de bobinas ya construidas o proyectadas; pero no son muy adecuadas para encarar el proyecto de un inductor, en este caso conviene modificar la Ec. 7-5, multiplicándola y dividiéndola por la relación  $l/D$

$$L = \frac{p^2 \cdot N^2 \cdot D^2}{\ell} \cdot k \cdot 10^{-3} = \left( k \cdot p^2 \cdot \frac{\ell}{D} \right) \cdot \frac{N^2 \cdot D^3}{\ell^2} \cdot 10^{-3} [\text{mH}, \text{cm}]$$

y llamando  $K$  a la cantidad entre paréntesis, y  $N_s$  a la relación  $N/l$  (espiras por centímetro), se obtiene la expresión:

$$\text{Ec. 7-7} \quad L = D^3 \cdot N_s^2 \cdot K \cdot 10^{-3} [\text{mH, cm}]$$

También en este caso, se tabula el factor **K** en función de la relación  $l/D$ , y eso se representa en forma gráfica (Figura 7-7).-

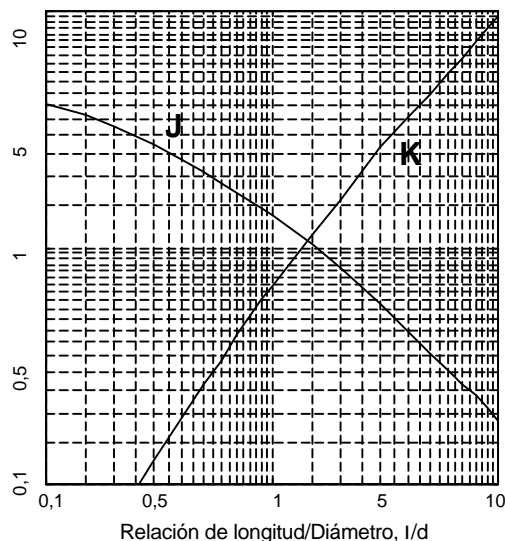


Figura 7-7. Curvas de los factores J y K vs  $l/D$

#### 7.1.1.2 Proyecto de inductores con núcleo de aire de una sola capa

##### 7.1.1.2.1 Datos

- 1) Valor de inductancia deseada **L**
- 2) Corriente circulante **I**
- 3) Frecuencia de trabajo **f**

##### 7.1.1.2.2 Planteo

Se parte de la Ec. 7-7

$$L = D^3 \cdot N_s^2 \cdot K \cdot 10^{-3} [\text{mH, cm}]$$

si en esta expresión se pueden llegar a conocer los valores de  $N_s$  y **D**, se podría despejar **K**; y entrando con este valor el gráfico, determinar la relación  $l/D$ . De esta ultima obtenemos el valor de **l** y conocido este valor se determina el número de espiras  $N = l \cdot N_s$ . Es decir que la solución del problema puede encararse buscando primero los valores mas convenientes de  $N_s$  y **D** y en función de estos encontrar **l** y **N**.-

##### 7.1.1.2.3 Desarrollo

Se efectúan los siguientes pasos:

###### 1 **Adopción de una densidad de corriente J.**

Normalmente puede tomarse  $4\text{Amp/mm}^2$ , y este valor debe ratificarse con el análisis final de la sobreelevación de temperatura.

###### 2 **Determinación de la sección del conductor.**

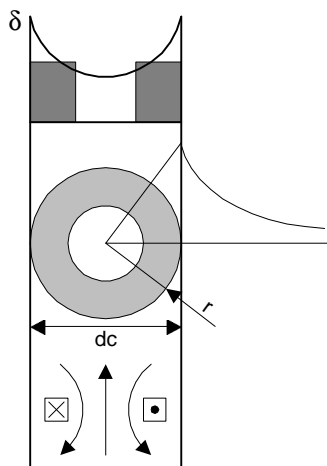
$$\text{Sección} = \frac{I_{ef}}{J}$$

donde **J** es la densidad de corriente.

###### 3 **Determinación del diámetro del conductor.**

Para esto hay que tener en cuenta el llamado efecto pelicular que provoca, en altas frecuencias, una distribución no homogénea de la





**Figura 7-8. Determinación de  $r$  por efecto pelicular.**

corriente en el conductor, la que se concentra en las zonas de mayor campo magnético. Para facilitar el cálculo se supone que la corriente circula solamente por una película de espesor  $r$  (Figura 7-8) en la cual la densidad de corriente es homogénea. El espesor  $r$  en el cobre, según **Termann** es:

$$r = \frac{6,62}{\sqrt{f}} [\text{cm}]$$

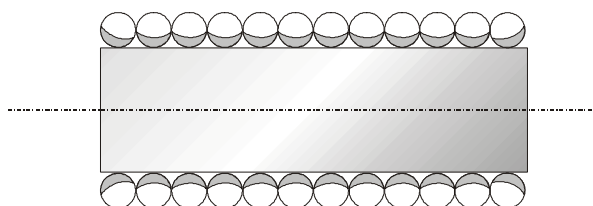
Determinando el espesor  $r$ , resulta fácil calcular el diámetro.

$$\begin{aligned} \text{Sección} &= \frac{p \cdot d_c^2}{4} - \frac{p \cdot (d_c - r)^2}{4} \\ &= p \cdot d_c \cdot r - p \cdot r^2 \\ &= p \cdot r \cdot (d_c - r) \end{aligned}$$

Pero si  $d_c \gg r$  se puede aproximar:

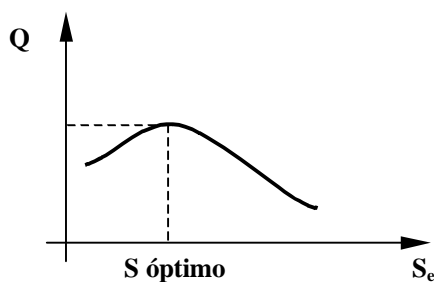
$$\text{Sección} \cong p \cdot r \cdot d_c \therefore d_c \cong \frac{\text{Sección}}{p \cdot r}$$

#### 4 Determinación de $N_s$



**Figura 7-9. La corriente se concentra en las zonas sombreadas.**

Para esto es necesario fijar la separación entre espiras. Es interesante observar que cuando dos o más conductores adyacentes conducen corriente, la distribución de corriente en los conductores está afectada por los flujos magnéticos producidos por el conductor y los adyacentes (efecto de proximidad), y la distribución es aproximadamente como muestra la Figura 7-9.

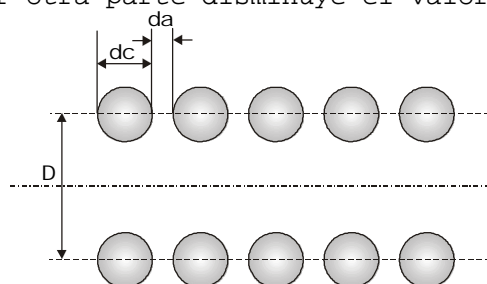


**Figura 7-10. Q versus  $S_e$ .**

El efecto de proximidad aumenta la resistencia real de un conductor y aumenta el Q del inductor:

$$Q = \frac{L \cdot \nu}{R}$$

Aumentando la separación entre las espiras disminuye el efecto de proximidad, pero por otra parte disminuye el valor de la inductancia.



**Figura 7-11. Separación óptima entre espiras.**

Si se aproximan las espiras será mayor la autoinducción pero será también mayor la influencia del efecto proximidad, con el consecuente aumento de la resistencia.

Si se grafica Q en función de la separación  $S_e$  (Figura 7-10), se observa que existe una separación óptima con la que se logra un Q máximo.

Según Butterworth esta separación corresponde a 0,41 de  $d_c$ .

Ante la duda conviene tomar una separación mayor pues la curva es mas suave a la derecha.

Sumando el diámetro del conductor mas la separación entre espiras se obtiene el paso.  $N_s$  es la inversa del paso:

$$N_s = \frac{1}{S_e + d_c}$$

##### **5 Adopción del valor de D.**

Para esto se debe tener en cuenta el espacio disponible, la experiencia previa, etc., y sobre todo que la relación  $l/D$ , que se vaya a obtener, conviene que sea  $1 < l/D < 2$ , dentro de estos valores D debe ser lo mas grande posible.

##### **6 Cálculo del valor de K.**

$$K = \frac{L \cdot 10^3}{N_s^2 + D^3}$$

##### **7 Obtención del gráfico de la relación $l/D$ , y como consecuencia determinación de l.**

##### **8 Obtención del numero de espiras N.**

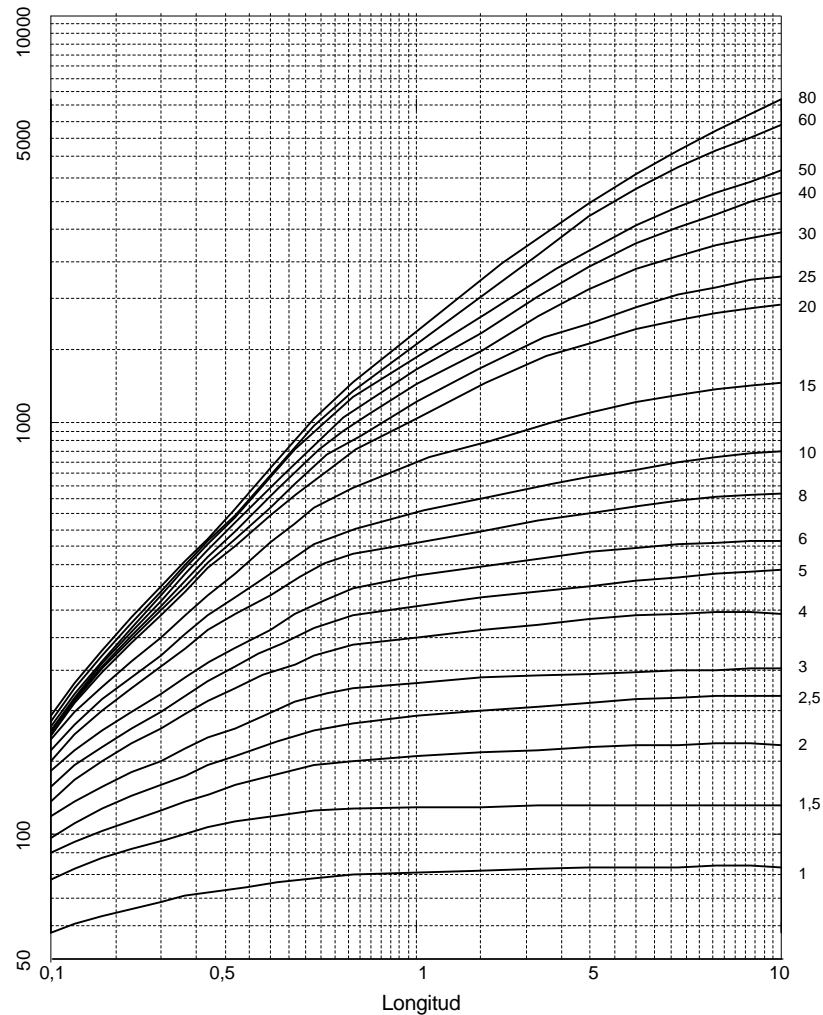
El número de espiras viene dado por  $N = N_s \cdot l$ .

##### **9 Determinación de la sobreelevación de temperatura.**

Para su obtención hay que conocer R, el concepto común de resistencia no es valido para RF, aquí:

$$R = \frac{V \cdot L}{Q}$$

El  $Q$  necesario para obtener la resistencia  $R$  que va a provocar la sobreelevación de temperatura, puede expresarse en función de la forma y de las dimensiones geométricas del solenoide, pero este  $Q$  calculado no es el que se mide con el  $Q$ -metro, ya que en la determinación del  $Q$  en función de la forma y de las dimensiones geométricas solo se tuvieron en cuenta el efecto pelicular y el de proximidad, mientras que el  $Q$ -metro mide además las pérdidas por irradiación que si bien disipan potencia no provocan calentamiento.



**Figura 7-12. Factor de forma  $Q_M$  para solenoides.**

El  $Q$  en función del diámetro  $D$  y la longitud  $l$  es:

$$Q = 8,55 \cdot \frac{D \cdot l}{102 \cdot l + 45 \cdot D} \cdot \sqrt{f \text{ [MHz]}}$$

llamando  $Q_M$  al factor de forma correspondiente a una frecuencia de 1MHz tenemos que:

$$Q_M = 8,55 \cdot \frac{D \cdot l}{102 \cdot l + 45 \cdot D}$$

entonces:

$$Q = Q_M \cdot \sqrt{f \text{ [MHz]}}$$

$Q_M$  puede graficarse en función de  $I$  y  $D$  (Figura 7-12).

Obteniéndose el valor de  $Q$  y el correspondiente valor de  $R$  puede obtenerse la potencia disipada ( $R \cdot I^2$ ), y la potencia que es necesario disipar por unidad de superficie. Con esta potencia por unidad de superficie se puede obtener, del gráfico correspondiente, la sobreelevación de temperatura, la que no deberá superar los valores prefijados; si esto ocurre habrá que rehacer los cálculos tomando un menor valor de densidad de corriente  $J$ , es decir, un alambre de mayor sección.

Como superficie de irradiación de calor se considerará:

- La superficie exterior del conductor, si la separación entre espiras es demasiado grande (inductancias muy grandes o con separación entre espiras mayor que el radio del conductor,  $S_e > r_c$ ).
- La superficie exterior de la bobina ( $\pi \cdot D \cdot l$ ), cuando estén bobinadas sobre una forma de material no conductor, y en general cuando  $S_e < r_c$ .

### 7.1.2 Inductores con núcleo de aire multicapas

Cuando se requieren valores de inductancia relativamente altos (por ejemplo superior al orden de los 150  $\mu H$ ), es difícil, por razones de espacio, lograrlo con inductores de una sola capa y se recurre a los inductores multicapas; los que normalmente se usan para frecuencias inferiores al orden de los 1500 Hz.-

El proyecto de inductores multicapas es algo más complicado que el de los inductores de una sola capa, pues aumenta el número de variables, y además si no se toman medidas especiales se incrementa la capacidad distribuida y las pérdidas.-

El problema de la capacidad distribuida y su disminución, puede solucionarse evitando que estén juntas espiras eléctricamente distantes, lo que se logra con el llamado **devanado en banco**, o con el **devanado angosto y profundo** o con el **devanado universal**.-

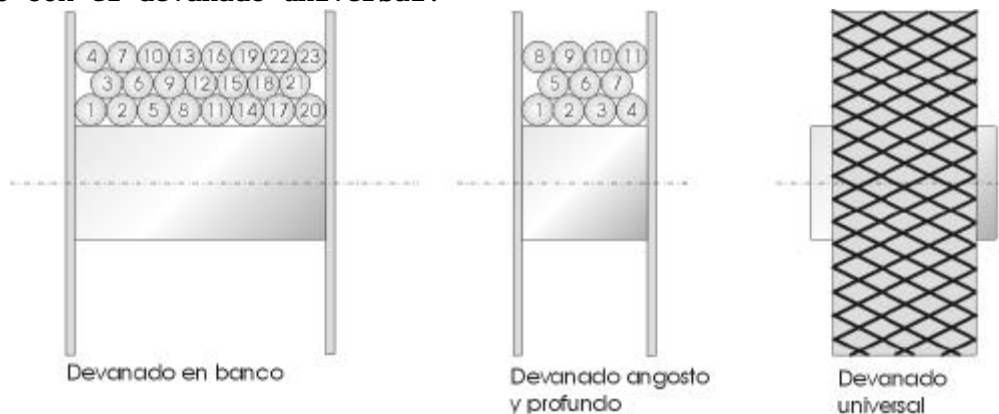
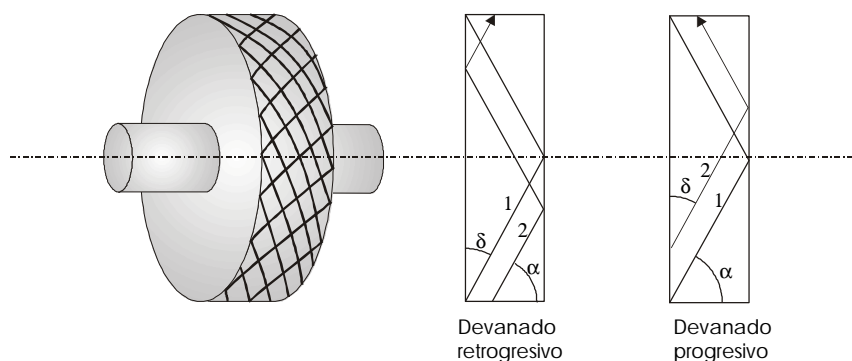


Figura 7-13. Distintos devanados multicapas.

El devanado universal, llamado también **nido de abeja** (**honey comb**), se caracteriza porque el conductor se arrolla transversalmente como puede verse en la Figura 7-14.-

Durante el proceso de arrollamiento, un guía-hilos conduce al conductor de un lado a otro de la bobina. El conductor es generalmente delgado o constituido por varios hilos delgados (tipo **Litz**) y por consiguiente fácilmente doblable, generalmente aislados con seda o algodón para facilitar su adherencia. La forma sobre la que se devana el inductor es generalmente de resina prensada, cartón baquelizado, porcelana no esmaltada, etc..-

En este arrollamiento los contactos entre espiras se reducen a puntos, con la consecuente disminución de las pérdidas y elevación del  $Q$ .-

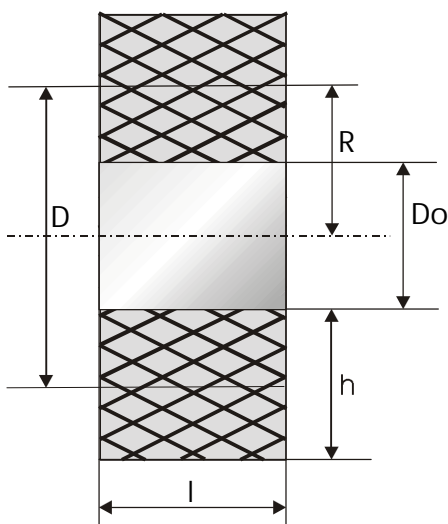


**Figura 7-14. Devanado universal o nido de abeja.**

Las características fundamentales de los inductores con devanado universal son: pequeña capacidad distribuida, alto  $Q$  y buena rigidez mecánica. Subdividiendo el arrollamiento en secciones se tiene una mayor disminución de la capacidad distribuida, un aumento de  $Q$ , y la posibilidad de una regulación del valor de la inductancia.-

El conductor puede desplazarse de un lado a otro de la bobina, 1, 2 y 3 veces por vuelta de la forma, pero lo que hay que tener en cuenta es que el comienzo y el final de cada espira no coinciden pues sino las sucesivas espiras están superpuestas. Estas deben terminar antes o después del comienzo. Si terminan antes, el devanado se llama **retrogresivo**; si terminan después, se llama **progresivo**. El ángulo  $\alpha$  puede variar dentro de amplios márgenes.-

Conviene que la separación entre conductores sea del 25% del diámetro de los mismos.-



**Figura 7-15. Dimensiones de inductor multicapa.**

Existen diversas formulas para calcular los inductores multicapas, algunas de las cuales se verán y analizaran a continuación.-

Una formula del **Manual de Terman** expresa la inductancia de un inductor multicapas como:

$$L = I \cdot \sqrt[3]{\frac{t^5}{d^2}} \text{ [mH]}$$

siendo:

$t$ = la longitud total del conductor.

$d$ = la distancia entre los centros de los conductores adyacentes (en pulgadas).

$I$ = un factor de corrección que se obtiene de la Figura 7-16 y que es función de  $h/R$  y de  $l/h$ .

En la Figura 7-15 se muestran las dimensiones de un inductor multicapa donde:

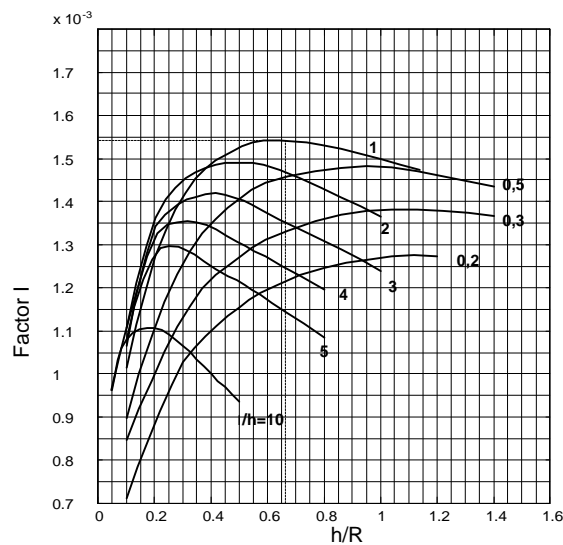
- $D_0$ : diámetro exterior de la forma.
- $D$ : diámetro medio de la bobina.
- $R$ : radio medio de la bobina.
- $h$ : espesor radial de la bobina.
- $l$ : longitud de la bobina, entre ejes de conductores extremos.

En el gráfico de la Figura 7-16 puede observarse que la inductancia máxima se obtiene (para una longitud dada del conductor) cuando la sección transversal del arrollamiento es cuadrada, y el lado de la misma es 0,662 del radio medio; es decir, que las relaciones optimas son:

$$\ell = h = 0,662 \cdot R$$

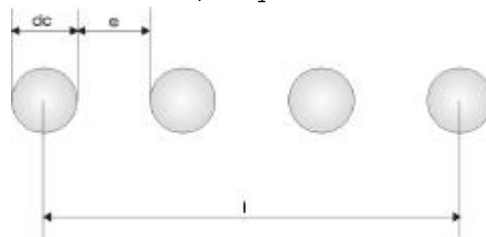
otra fórmula es la de **Wheler**:

$$L = \frac{D^2 \cdot N^2}{38 \cdot D + 114 \cdot \ell + 127 \cdot h} [\text{mH}, \text{cm}]$$



**Figura 7-16. Factor I correspondiente a una bobina de varias capas de forma solenoidal.**

Esta fórmula está dentro del 1% de tolerancia, cuando se cumplen las relaciones optimas mencionadas entre  $l$ ,  $h$  y  $D$ .



**Figura 7-17. Dimensiones de una espira.**

Las formulas anteriores son útiles para la verificación y el calculo de la inductancia de inductores ya construidos, pero no son practicas para resolver problemas de diseño. Para este caso se puede obtener una formula que permita resolver fácilmente el problema partiendo de la formula para inductores de una capa:

$$L = J \cdot N^2 \cdot R$$

pero teniendo en cuenta que  $J$  no va a ser función solamente de  $l/D_0$  como en los de una sola capa, sino también de  $h/l$ ; y llamando  $p = l/D_0$  y  $q = h/l$  se tiene que:

$$L = J(p, q) \cdot N^2 \cdot R$$

Si  $m$  es el número de capas, y  $n_c$  el de espiras por capas, se tiene:

$$N = m \cdot n_c$$

pero  $m = h/d_c$  y

$$n_c = \frac{\ell}{d_c + e} + 1$$

el cual, como se ve en la Figura 7-17:

$d_c$  = diámetro del conductor con aislación y forro.

$e$  = separación entre espiras.

entonces:

$$N = m \cdot n_c = \frac{h}{d_c} \cdot \left( \frac{\ell}{d_c + e} + 1 \right)$$

y como el radio  $R$  es:

$$R = \frac{D_0 + h}{2}$$

se tiene que:

$$L = J(p, q) \cdot \left( \frac{h}{d_c} \cdot \left( \frac{\ell}{d_c + e} + 1 \right) \right)^2 \cdot \left( \frac{D_0 + h}{2} \right)$$

multiplicando y dividiendo por  $\ell^3$ :

$$L = \frac{J(p, q)}{2} \cdot \frac{1}{d_c^2} \cdot \left( \frac{h}{\ell} \right)^2 \cdot \left( \frac{\ell}{d_c + e} + 1 \right)^2 \cdot \left( \frac{D_0 + h}{\ell} \right) \cdot \ell^3$$

y siendo:

$$\frac{D_0 + h}{\ell} = \frac{D_0}{\ell} + \frac{h}{\ell} = \frac{1}{p} + q$$

nos queda:

$$L = \frac{J(p, q)}{2} \cdot q^2 \cdot \left( \frac{1}{p} + q \right) \cdot \left( \frac{\ell}{d_c + e} + 1 \right)^2 \cdot \frac{\ell^3}{d_c^2}$$

Llamando  $M$  al producto de todos los factores que contengan  $p$ ,  $q$  o sean función de  $p$  y  $q$ , o sea:

$$M = \frac{J(p, q)}{2} \cdot q^2 \cdot \left( \frac{1}{p} + q \right)$$

y como en la practica se puede tomar  $e = 0,25$  de  $d_c$  nos queda:

$$L = M(p, q) \cdot \left( \frac{\ell}{1,25 \cdot d_c} + 1 \right)^2 \cdot \frac{\ell^3}{d_c^2}$$

En la Figura 7-18 se grafican los valores de  $M = f(p)$  con  $q$  como parámetro.-

Se advierte que en la formula no aparece el número de espiras.-

El diámetro  $d_c$  es el bruto con aislación y la separación entre conductores es igual al 25% del  $d_c$ . Las medidas son en centímetros.-

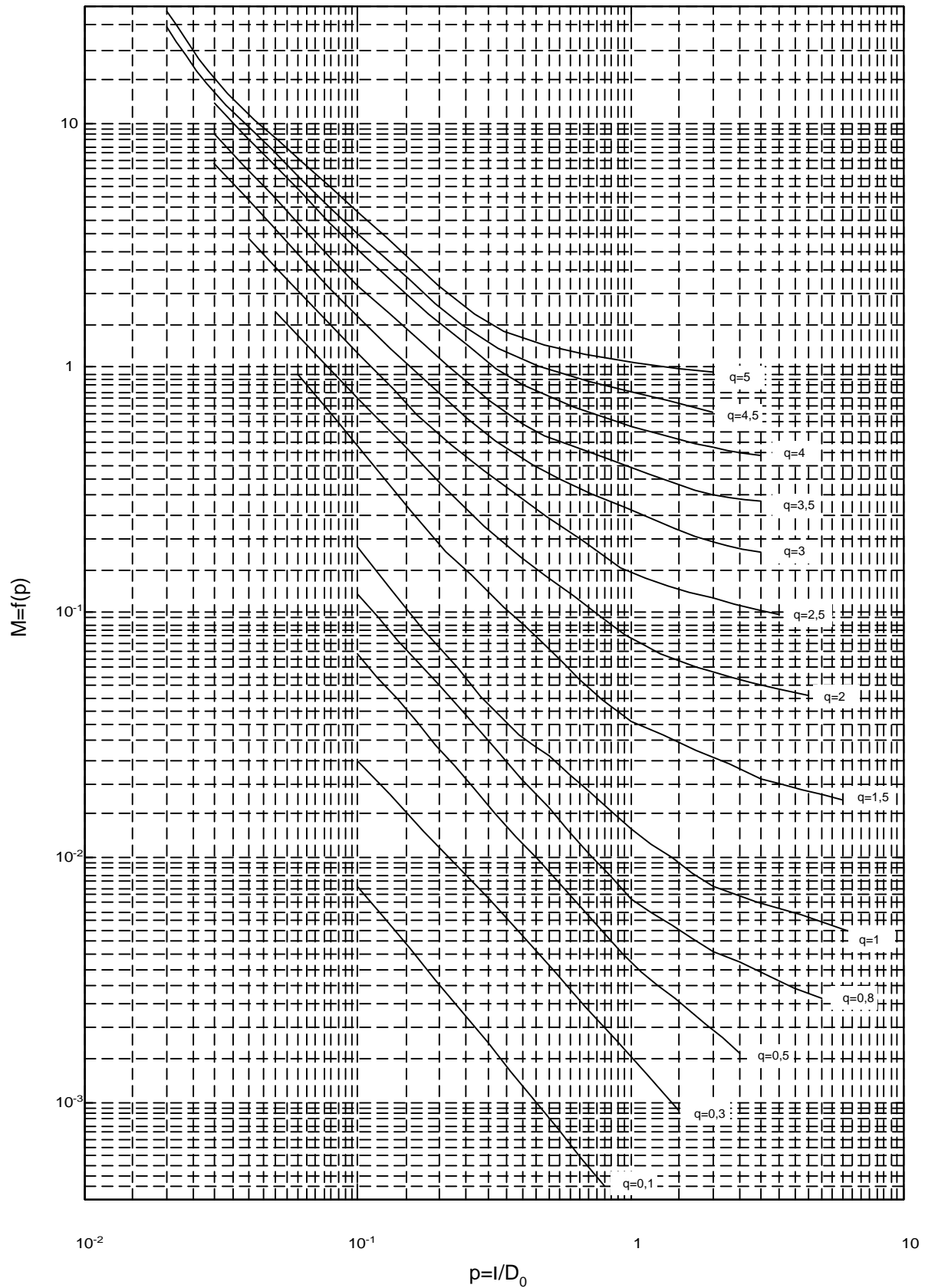


Figura 7-18.  $M=f(p)$  y  $q$  como parámetro. Todas las medidas en cm.



### 7.1.2.1 Verificación de inductores multicapas

Se puede utilizar cualquiera de las expresiones planteadas.-

En el caso de tener que determinar el número de espiras de un inductor, se puede proceder así: se coloca en un núcleo la bobina cuyo número de espiras se procura determinar y otra de un número de espiras conocido.-

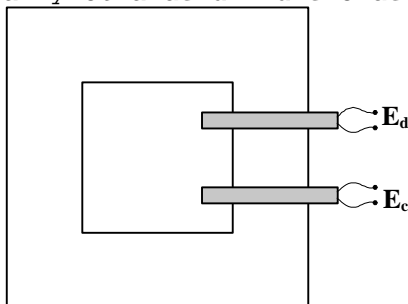


Figura 7-19. Verificación de inductor multicapa.

Se aplica una tensión conocida **Ec** a una de ellas, y se mide con un V.A.V. la tensión **Ed** que aparece en los bornes de la otra (Figura 7-19). La relación de tensiones será igual a la relación del número de vueltas.-

$$\frac{E_d}{E_c} = \frac{N_d}{N_c}$$

### 7.1.2.2 Proyecto de inductores multicapas:

#### 7.1.2.2.1 Datos

1. Valor de la inductancia deseada **L**
2. Corriente circulante **I**
3. Frecuencia de trabajo **f**

#### 7.1.2.2.2 Planteo

Se utiliza la expresión:

$$\text{Ec. 7-8} \quad L = M \cdot \left( \frac{1}{1,25d_c} + 1 \right)^2 \cdot \frac{\ell^3}{d_c^2}$$

y el gráfico de **M** en función de **p** y **q**.-

Cuando estas bobinas se usan como choques, no circulan por las mismas corrientes alternas, sino solamente corriente continua, es decir que hay una distribución uniforme de corriente en el conductor.-

Cuando se usan con frecuencias de orden de 1MHz o menores el error que se comete, si no se tiene en cuenta el efecto pelicular, es del orden del 3 al 5%, error en general aceptable en un proyecto de este tipo.-

#### 7.1.2.2.3 Desarrollo

1. Adopción de una densidad de corriente **J**.

Normalmente puede tomarse 2 amperes/mm<sup>2</sup>, y este valor debe ratificarse o rectificarse con el análisis final de sobreelevación de temperatura.-

2. Determinación de la sección y el diámetro del conductor.

$$\text{Sección} = \frac{1}{J} = \frac{p \cdot d_c^2}{4}$$

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot \text{Sección}}{p}}$$

**3. Adopción de un  $D_0$  y un valor de  $l$ .**

Se adoptan valores tentativos de  $D_0$  y de  $l$  que se ratifican o no según los resultados del paso 5; como referencia conviene mencionar que la relación  $p=l/D_0$  conviene que sea del orden del 0,5.-

**4. Cálculo del valor de  $M$ .**

De la Ec. 7-8 se despeja  $M$ :

$$M = \frac{L}{\left(\frac{1}{1,25 \cdot d_c} + 1\right)^2 \cdot \frac{\ell^3}{d_c^2}}$$

**5. Obtención del valor de  $h$ .**

Se entra en el gráfico con los valores de  $p$  y de  $M$ , obteniéndose  $q=h/l$ . Conviene recordar que la  $L_{\max}$  se obtiene cuando  $l=h$ .

Además conviene que:  $h/r$  esté entre 0,6 y 0,8. Si el valor obtenido no es convincente, puede reverse el paso 3.

**6. Cálculo de la sobreelevación de temperatura.**

Para el cálculo de la sobreelevación de temperatura, es necesario conocer la longitud total del conductor,  $l_{\text{total}} = \pi \cdot (D_0 + h) \cdot N$ , y luego la resistencia total. Luego se calcula la potencia disipada  $W = R \cdot I^2$ , y en base a la superficie de transmisión de calor, se determina la sobreelevación de temperatura.

Como superficie de transmisión pueden tomarse las superficies verticales, las que dependen de la ubicación de la bobina (Figura 7-20).

En todos los casos el criterio juega un papel muy importante en el diseño de inductores.

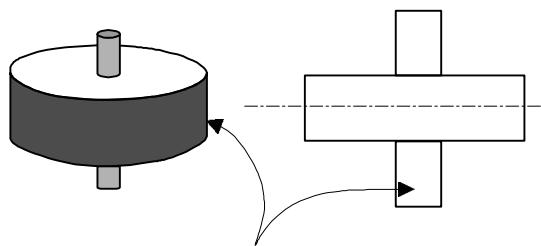


Figura 7-20. Superficie de transmisión del calor.

### 7.1.3 Inductores con núcleo de material magnético

Analizando la expresión de la inductancia:

$$\text{Ec. 7-9} \quad L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot S}{\ell}$$

Se observa que el valor de  $L$  es directamente proporcional a la permeabilidad  $\mu_r$  del material del núcleo, de lo que se desprende que utilizando núcleos de material magnético (altos valores de  $\mu_r$ ) se pueden obtener altos valores de inductancias con menor número de espiras y/o menor sección, lográndose como consecuencia una reducción del tamaño del inductor, y lógicamente una disminución de la resistencia interna.-

Además en estos casos, el flujo queda prácticamente confinado en el material magnético, y por consiguiente la dispersión es mucho menor que con núcleo de aire.-

En contraposición a estas ventajas, estos inductores tienen inconvenientes, como ser: pérdidas en el material magnético, no constancia del valor de la inductancia, la que va a depender de la corriente circulante, como consecuencia de las características no lineales de magnetización, de los materiales magnéticos, etc..-

Los materiales magnéticos usados como núcleos, son: el hierro laminado (aleaciones de Fe-Si, Fe-Ni, etc.) el hierro pulverizado y las cerámicas magnéticas.-

A continuación se estudiarán los inductores con núcleo de hierro laminado.-

#### 7.1.4 Inductores con núcleo de hierro laminado

Se usan principalmente como filtros o bobinas de choque, y su campo de aplicación, se extiende desde los 10Hz a los 50KHz.-

Generalmente se construyen con laminaciones normales, siendo las más comunes, las del tipo **E-I** o **U-I**.-

Desde el punto de vista constructivo, se pueden presentar tres casos:

1. Inductor sin junta ni entrehierro.
2. Inductor con junta.
3. Inductor con entrehierro.

Desde el punto de vista funcional, se presentan tres posibilidades:

1. Con circulación de corriente alterna solamente.
2. Con circulación de c.a. y c.c. superpuestas.
3. Con circulación de c.c. solamente.

Si en la Ec. 7-9 se reemplaza  $\mu_0$  por su valor (en el sistema M.K.S.  $\mu_0=4\cdot\pi\cdot10^{-7}$ ) se obtiene la siguiente expresión general de la inductancia:

$$\text{Ec. 7-10} \quad L = \frac{4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S}{\frac{1}{m_r} \cdot \ell} \cdot 10^{-7} \text{ [H]}$$

en la cual  $\mu_r$  puede ser:

- A. La permeabilidad normal  $\mu=B/H$ .
- B. La permeabilidad incremental  $\mu_\Delta=\Delta B/\Delta H$  (en el caso de haber una componente de c.a. superpuesta a una componente de c.c.).
- C. La llamada permeabilidad efectiva  $\mu_0$  (en el caso de haber entrehierro).

- Con corriente alterna:

$$m_0 = \frac{B}{H_{\text{total}}} = \frac{B}{H_h + H_a} = \frac{1}{\frac{H_h}{B} + \frac{H_a}{B}} = \frac{1}{\frac{1}{m} + \frac{\ell_a}{\ell_h}}$$

$$\frac{1}{m_0} = \frac{1}{m} + \frac{\ell_a}{\ell_h}$$

- Con corriente continua y alterna superpuestas:

$$m_0 = \frac{\Delta B}{\Delta H_{\text{total}}} = \frac{\Delta B}{\Delta H_h + \Delta H_a} = \frac{1}{\frac{\Delta H_h}{\Delta B} + \frac{\Delta H_a}{\Delta B}} = \frac{1}{\frac{1}{m} + \frac{\ell_a}{\ell_h}}$$

$$\frac{1}{m_0} = \frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h}$$

En este último caso, la Ec. 7-10 puede escribirse:

$$L = \frac{4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S}{\left( \frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_s}{\ell_h} \right) \cdot \ell} \cdot 10^{-7}$$

Al denominador de esta expresión se lo puede llamar longitud

efectiva del circuito magnético  $\ell_s$ .-

$$\ell_s = \left( \frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h} \right) \cdot \ell$$

y así se tiene:

$$L = \frac{4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S}{\ell_s} \cdot 10^{-7}$$

#### 7.1.4.1 Relaciones fundamentales

Cuando se supone que el flujo magnético en el núcleo varía senoidalmente, lo cual corresponde aproximadamente a la casi totalidad de las aplicaciones prácticas, la relación entre el flujo y la tensión inducida es:

$$E_{ef} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \text{ [V, Weber]}$$

Si  $\Phi$  se expresa en **Maxwell**:

$$E_{ef} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ [V, Maxwell]}$$

El valor del flujo es independiente de las dimensiones y calidad del núcleo (mientras la resistencia del bobinado sea tal que la caída de tensión que sobre ella se desarrolla, sea despreciable frente al valor de la tensión aplicada).-

Las dimensiones y calidad del núcleo intervienen en la determinación del valor de la corriente de excitación requerida para mantener el flujo magnético necesario.-

Si se supone el flujo senoidal, la corriente de excitación en general no es senoidal, pero en la práctica se trata como si los fuese. La aproximación de suponerla senoidal está ampliamente justificada, con excepción de algunos problemas específicos.-

La corriente de excitación tiene dos componentes:  $I_m$  (corriente de magnetización) en fase con el flujo, y en cuadratura con la tensión aplicada; e  $I_p$  (corriente de pérdidas) en fase con dicha tensión.-

$$I_{ex} = \sqrt{I_p^2 + I_m^2}$$

El diagrama vectorial es el que muestra la Figura 7-21.-

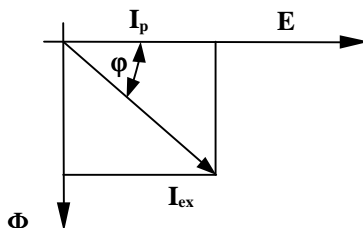


Figura 7-21. Diagrama vectorial de un inductor.

La corriente de magnetización está vinculada a las demás magnitudes del circuito por medio de la siguiente relación:

$$0,4 \cdot p \cdot N \cdot I = H \cdot \ell \text{ [Oersted, cm]}$$

#### 7.1.4.2 Verificación de inductores con núcleo de hierro sin circulación de c.c.

La verificación consiste en determinar, en inductores ya diseñados, el valor de  $L$ , partiendo de conocer los siguientes datos:

**7.1.4.2.1 Datos**

1. Sección del hierro.
2. Longitud del circuito magnético.
3. Características **B-H** del material del núcleo.
4. Numero de vueltas.
5. Tensión aplicada.
6. Frecuencia de trabajo.
7. Eventualmente numero de juntas o valor del entrehierro.

**7.1.4.2.2 Planteo**

La determinación del valor de **L** es inmediata cuando se llega a conocer la corriente de magnetización **I<sub>m</sub>**, ya que:

$$\text{Ec. 7-11} \quad L = \frac{E}{V \cdot I_m}$$

La etapa previa seria entonces la obtención de la corriente de magnetización, la que es igual a:

$$I_m = \frac{(N \cdot I)_{\text{totales}}}{N}$$

Pero los **(N·I)** totales son los amperios-espiras necesarios para obtener una inducción dada en el hierro, mas los amperios-espiras necesarios para forzar el flujo a través de las juntas o entrehierro (cuando los hay).-

$$(N \cdot I)_{\text{totales}} = (N \cdot I)_{\text{hierro}} + (N \cdot I)_{\text{aire}}$$

Los **(N·I)<sub>hierro</sub>** se obtienen de la expresión:

$$\text{Ec. 7-12} \quad 0,4 \cdot p \cdot N \cdot I = H \cdot \ell$$

previamente a haber despejado el correspondiente valor de **H** de la curva **B-H** del material magnético, entrando con el valor de **B** el que puede despejarse de la expresión:

$$\text{Ec. 7-13} \quad E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot S_h \cdot B \cdot 10^{-8} \text{ [V]}$$

Los **(N·I)<sub>aire</sub>** se obtienen, o del gráfico de amperios-espiras, para forzar el flujo a través de una junta<sup>37</sup>, o analizando la recta del entrehierro en el gráfico<sup>38</sup> **B-H**, en ambos casos, entrando con el valor de **B** ya obtenido.-

**7.1.4.2.3 Desarrollo****1. Obtención del valor de B.**

De la Ec. 7-13 se despeja **B**.

**2. Obtención del valor de H en el material magnético.**

Conociendo las características **B-H** del material magnético, se halla el valor de **H** en el hierro, partiendo del valor de **B** ya obtenido.

**3. Caso de circuitos sin juntas ni entrehierro.**

**Obtención directa de I.**

De la Ec. 7-12 se despeja **I** (**I** pico), que reemplazada en la Ec. 7-11 permite obtener directamente el valor de la inductancia **L**.

**4. Caso de laminaciones con juntas.**

**Obtención de los (N·I)<sub>h</sub>, los (N·I)<sub>j</sub> y luego el valor de I.**

Los **(N·I)<sub>h</sub>** se obtienen de la expresión

$$(N \cdot I)_h = \frac{H_h \cdot \ell_h}{0,4 \cdot p}$$

<sup>37</sup> Véase Laminaciones (pag. 70).

<sup>38</sup> Véase Circuito Magnético (pag. 64).

Los  $(N \cdot I)_j$  del gráfico de Amperios-espiras para forzar el flujo a través de una junta. La corriente  $I$  será:

$$I_{\text{pico}} = \frac{(N \cdot I)_h + (N \cdot I)_j}{N}$$

luego

$$L = \frac{E}{v \cdot I}$$

#### 5. Caso de laminaciones con entrehierro.

**Obtención del  $H_{\text{total}}$  y luego el valor de  $I$ .**

Se entra con el valor hallado de  $B$  a las características  $B-H$  (Figura 7-22) del material magnético, y se obtiene el punto  $M$ . Por  $M$  se traza una recta con pendiente

$$\text{tg } \alpha = \frac{\ell_h}{\ell_n}$$

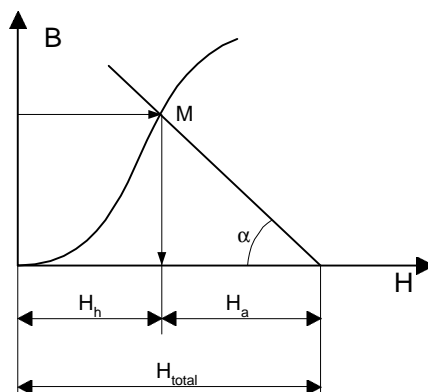
que corte al eje de las abscisas en el punto  $M$  correspondiente al  $H_{\text{total}}$  de la expresión:

$$H_h \cdot \ell_h = 0,4 \cdot p \cdot (N \cdot I)_h$$

se despeja  $I$ , luego la expresión:

$$L = \frac{E}{v \cdot I}$$

nos da el valor de  $L$ .



**Figura 7-22 Características B-H.**

Normalmente la construcción con entrehierro no se utiliza en inductores sin circulación de c.c. en algunos casos, se introducen pequeños entrehierros para efectuar ajustes, o evitar saturaciones.-

#### **7.1.4.3 Proyecto de inductores con núcleo de hierro sin circulación de c.c.**

##### **7.1.4.3.1 Datos**

1. Valor de inductancia deseada  $L$ .
2. Tensión eficaz sobre el inductor  $E$ .
3. Frecuencia de trabajo.
4. Curva de magnetización  $B-H$  del material del núcleo.

### 7.1.4.3.2 Planteo

Una de las primeras etapas en el proyecto de un inductor, es la elección del circuito magnético, y por lo tanto de la laminación a emplear. Se parte de la base que se utilizan laminaciones comerciales. La elección de la laminación se basa en estimar la sección de la rama central del circuito magnético en base a la potencia a manejar, y considerando, en primera aproximación, a la sección cuadrada, es despejar el valor del nacho de la rama central de la laminación. Luego se elige una laminación cuya rama central tenga este valor.-

### 7.1.4.3.3 Desarrollo

#### 1. Determinación de la corriente circulante.

$$I = \frac{E}{V \cdot L}$$

#### 2. Estimación de la sección de la rama central del circuito magnético.

Se parte de la expresión:

$$S_h = K \sqrt{W}$$

Siendo **K** una constante que se elige entre 1 y 2.

Cuando se quiere una buena regulación se toma 2, y en caso contrario 1 o valores intermedios.

El valor de **W** es:

$$W = E_{ef} \cdot I_{ej}$$

Mas sección del hierro significa menor número de vueltas y mejor regulación; al ser menor la resistencia del alambre (ver *transformadores de alimentación*).

#### 3. Elección de la laminación.

Conociendo la sección del hierro, y suponiendo en una primera estimación que sea cuadrada.

$$S_h = 0,95 \cdot a^2$$

Se obtiene el valor de **a**

$$a = \sqrt{\frac{S_h}{0,95}}$$

Con el valor de **a** se puede elegir una laminación cuya rama central tenga este valor.

#### 4. Adopción de un valor de B.

Se adopta un valor de inducción, lo mas alto posible, pero en forma tal que no sature el material magnético.

#### 5. Obtención del valor de H en el hierro, y de los (N·I).

Una vez fijado **B**, se busca el correspondiente valor de **H<sub>h</sub>** en las curvas **B-H** del material magnético, y con estos valores de **H<sub>h</sub>**, los **(N·I)<sub>h</sub>**.

$$(N \cdot I)_h = \frac{H_h \cdot \ell_h}{0,4 \cdot \mu}$$

#### 6. Obtención de los (N·I)<sub>j</sub>.

Del gráfico **B-(N·I)<sub>j</sub>**, pueden obtenerse los amperios-espiras necesarios para forzar el flujo a través de una juntas, y multiplicarlos por el numero de juntas se obtienen los **(N·I)<sub>j</sub>**.

#### 7. Obtención de N.

$$N = \frac{(N \cdot I)_h + (N \cdot I)_j}{I_{pico}}$$

**8. Determinación de la sección y diámetro del conductor.**

Se adopta una densidad de corriente, en principio  $J=2[\text{Amp}/\text{mm}^2]$  y como se conoce la corriente circulante, se puede obtener la sección requerida, del conductor:

$$S_c = \frac{I}{J}$$

**9. Verificación de la sección de la ventana.**

Si se multiplica a  $N$  por la sección del alambre, se obtendrá la sección del cobre que debe colocarse en la ventana. Este valor debe estar entre 0,3 y 0,4 de la sección de la ventana. Si es mayor, el número de espiras proyectadas no cabe en la ventana. Si es menor, sobra ventana, y el inductor proyectado es antieconómico.

$$S_{cu} = N \cdot S_c \quad 0,3 \text{ a } 0,4 S_{vent}.$$

Para un calculo mas exacto, debe dibujarse la sección de la ventana en escala, y en la misma, ubicarse los conductores.

**10. Determinación del verdadero valor de la sección de la rama central y determinación del apilado.**

De la expresión:

$$E_{ef} = 4,44 \cdot N \cdot B \cdot S_h \cdot f \cdot 10^{-8} \text{ [V]}$$

se despeja  $S_h$  y como  $S_h = 0,95 a \cdot A_p$  el apilado será:

$$A_p = \frac{S_h}{0,95 \cdot a}$$

Hay que tener en cuenta que el apilado debe estar comprendido entre 1 y  $1,5 \cdot a$ .

**11. Verificación de la sobreelevación de temperatura.**

La etapa final es la verificación de la sobreelevación de temperatura. Si la misma supera los valores prefijados, habrá que disminuir el valor de  $B$  o  $j$  y recalcular el inductor.

**7.1.4.4 Inductores con núcleo de hierro laminado y circulación de c.c. y c.a. superpuestas**

La presencia de una componente de c.c. hace que la zona de funcionamiento se desplace hacia la zona de saturación (Figura 7-24), y como consecuencia se produce una disminución de la permeabilidad incremental, lo que trae aparejado una disminución de la inductancia, o un aumento del volumen del hierro y/o un aumento del número de espiras, para lograr el mismo valor de la inductancia.-

Podría pensarse que este problema puede evitarse limitando el valor de c.c. que circula por el inductor, pero esto no es posible pues el valor de  $I_{cc}$  es función de factores ajenos al inductor.-

En la práctica se trata de solucionar el problema de los inductores con circulación de corriente continua y alterna superpuestas mediante la introducción de un entrehierro; en este caso, la **f.m.m.** en el material magnético disminuye, alejándose el punto de funcionamiento de la zona de saturación; esto trae aparejado un aumento de la permeabilidad incremental y lógicamente un aumento de la inductancia, pero en contraposición a esta ventaja, se tiene un aumento de la reluctancia del circuito, lo que hace disminuir el valor de la inductancia.-

Existe un entrehierro optimo para el cual el aumento de inductancia como consecuencia del aumento de permeabilidad incremental compensa la disminución que se obtiene como consecuencia del aumento de reluctancia.-

El problema de diseño es, encontrar una relación  $I_a/I_h$  (Figura 7-23) que de la máxima inductancia para un determinado valor de c.c. circulante, y con la mínima cantidad de material magnético.-



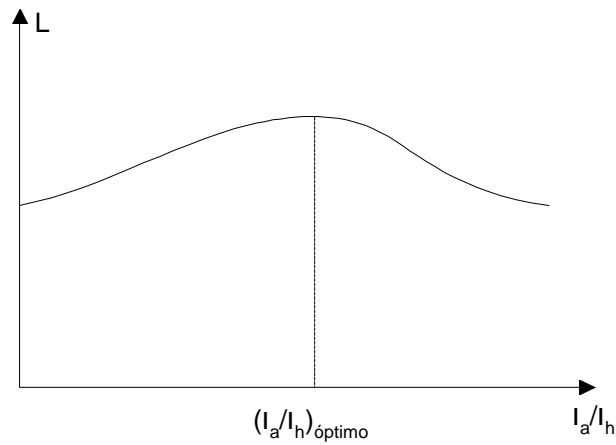


Figura 7-23. Variación de  $L$  respecto de la relación  $I_a/I_h$ .

Existen varios métodos de resolución que permiten encontrar la relación óptima. A continuación se analizarán dos: el método de **Hanna** y el método de las curvas **M**.-

La expresión de la inductancia en el caso de inductores con entrehierro puede obtenerse de la expresión general de la inductancia reemplazando  $\mu$  por el valor de  $\mu_0$ .-

$$L = \frac{0,4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S_h}{\ell_h} \cdot m_0 \cdot 10^{-8} \text{ [Hy]}$$

$$L = \frac{0,4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S_h}{\ell_h} \cdot \frac{1}{\frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h}} \cdot 10^{-8} \text{ [Hy]}$$

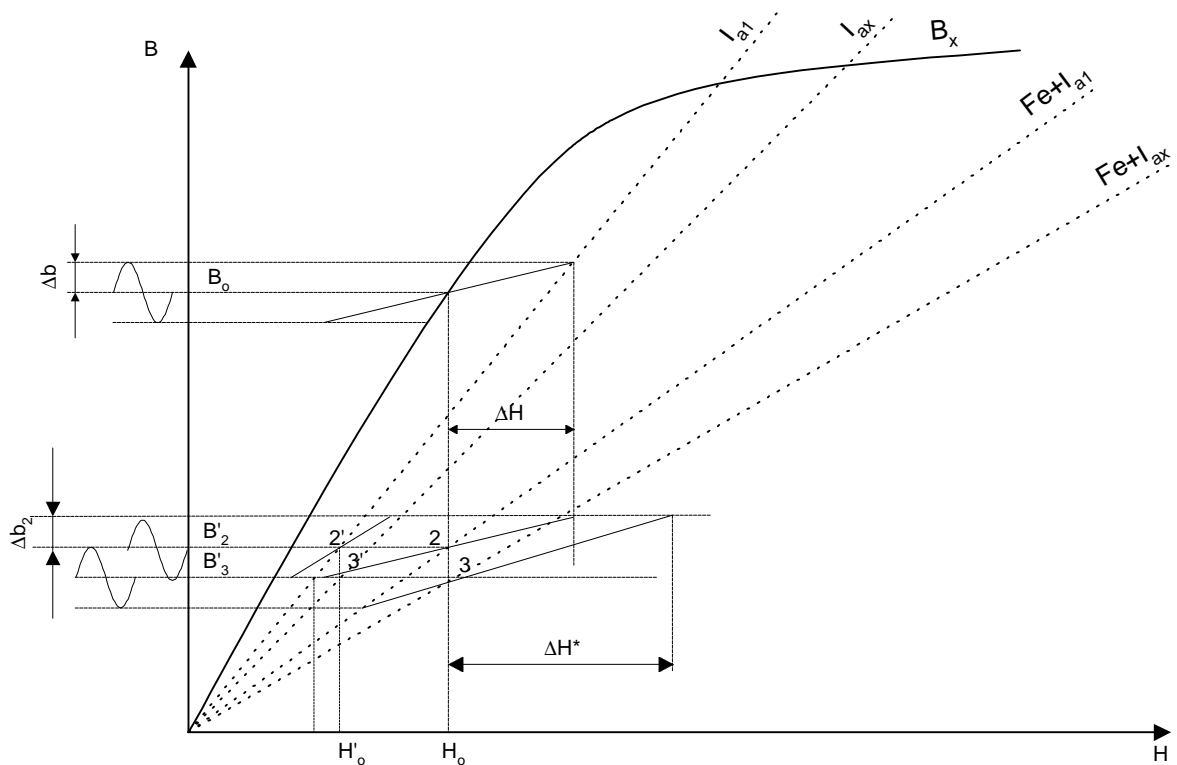


Figura 7-24. Variación de  $B$  y  $H$  del núcleo de un inductor con tensión continua y alterna superpuestas.

### 7.1.5 Método de Hanna

La hipótesis de este método es suponer despreciable la amplitud  $\Delta B$  de la componente de c.a.-

Observando la formula

$$L = \frac{0,4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S_h}{\ell_h} \cdot \mu_0 \cdot 10^{-8} \text{ [Hy]}$$

se ve que en la misma figuran cuatro incógnitas  $N$ ,  $S_h$ ,  $\ell_h$ , y  $\mu_0$ .-

Se buscara de fijar el valor de alguna de estas incógnitas.-

Se puede fijar el valor de la sección mediante el criterio de la potencia a manejar por el núcleo

$$S_h = 1,2 \text{ a } 2 \cdot \sqrt{p}$$

siendo  $P$  la potencia reactiva, y eligiéndose el coeficiente según los requerimientos de regulación de tensión que se impusieren.-

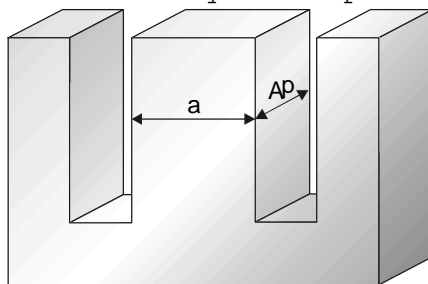


Figura 7-25. Dimensiones del núcleo.

Se puede también fijar el valor de  $\ell_h$ . Para esto, se parte de que:  $S_h = 0,95 \cdot a \cdot A_p$ ; de aquí se puede despejar  $a$ , teniendo en cuenta que  $A_p$  debe valer entre 1 y 1,5 de  $a$  (Figura 7-25).-

Una vez determinados  $\ell_h$  y  $S_h$ , quedan dos incógnitas:  $N$  y  $\mu_0$ .-

Evidentemente cuanto mayor sea  $\mu_0$ , menor serán  $N$ , y mas económico será el inductor.-

El propósito será entonces, hacer  $\mu_0$  máximo:

$$\frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_\Delta} - \frac{\ell_a}{\ell_h}$$

Para el análisis de la solución se parte de la expresión:

$$\text{Ec. 7-14} \quad L = \frac{0,4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S_h}{\ell_h} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h}} \cdot 10^{-8} \text{ [Hy]}$$

Aquí se reemplaza a  $N$  por una expresión en función de  $B$ , que se obtiene de:

$$0,4 \cdot p \cdot N \cdot \hat{I}_{cc} = H_h \cdot \ell_h + H_a \cdot \ell_a = m \cdot H_h \cdot \frac{\ell_h}{m} + H_a \cdot \ell_a$$

Haciendo los siguientes reemplazos:

$$H_a = B(m_t = 1) \text{ y } m \cdot H_h = B$$

y operando:

$$0,4 \cdot p \cdot N \cdot I_{cc} = B_{cc} \cdot \left( \frac{\ell_h}{m} + \ell_a \right) = B_{cc} \cdot \ell_h \cdot \left( \frac{1}{m} + \frac{\ell_a}{\ell_h} \right)$$

$$\text{Ec. 7-15} \quad \frac{N \cdot I_{cc}}{\ell_h} = \frac{B_{cc}}{0,4 \cdot p} \cdot \left( \frac{1}{m} + \frac{\ell_a}{\ell_h} \right)$$

luego:

$$N = \frac{B_{cc} \cdot \ell_h}{0,4 \cdot p \cdot I_{cc}} \cdot \left( \frac{1}{m} + \frac{\ell_a}{\ell_h} \right)$$

Reemplazando este valor de  $N$  en la Ec. 7-14 se tiene:

$$L = \frac{B_{cc}^2 \cdot S_h \cdot \ell_h}{0,4 \cdot p \cdot I_{cc}^2} \cdot \frac{\left( \frac{1}{m} + \frac{\ell_a}{\ell_h} \right)^2}{\left( \frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h} \right)} \cdot 10^{-8} \text{ [Hy]}$$

Reagrupando factores, y teniendo en cuenta que  $S_h \cdot \ell_h = V_h$  se obtiene:

$$\text{Ec. 7-16} \quad \frac{L \cdot I_{cc}^2}{V_h} = \frac{B_{cc}^2}{0,4 \cdot p} \cdot \frac{\left( \frac{1}{m} + \frac{\ell_a}{\ell_h} \right)^2}{\left( \frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h} \right)} \cdot 10^{-8} \text{ [Hy]}$$

donde:

$\mu_\Delta$  = pendiente de la curva de magnetización del material en el punto de funcionamiento.

$\mu$  = permeabilidad relativa del punto de funcionamiento estático.

El  $\mu$  empleado es el  $\mu$  estático de funcionamiento continuo

$$m = \frac{B_{cc}}{H_h}$$

ya que se supuso  $\Delta B = 0$ .

Partiendo de las Ec. 7-15 y Ec. 7-16 se hace la representación de  $L \cdot I_{cc}^2 / V_h$  en función de  $(N \cdot I_{cc}) / \ell_h$  para cada valor de  $B$ , tomando a  $\ell_a / \ell_h$  como parámetro.-

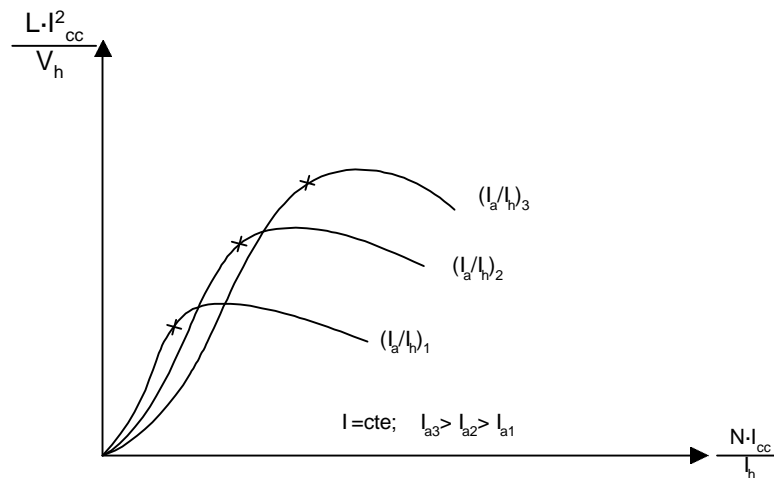


Figura 7-26

Haciendo variar  $B$ , y utilizando en cada caso las permeabilidades correspondientes, se pueden calcular los pares de valores  $(N \cdot I_{cc}) / \ell_h$  y  $L \cdot I_{cc}^2 / V_h$  y graficarlos.-

Es natural que independientemente de  $N$ ,  $I_a/I_h$  debe elegirse de manera de hacer  $L$  máximo, por lo que interesan los puntos marcados (x) en la Figura 7-26 pues a la derecha de los mismos, pequeños incrementos de  $I$  requieren grandes aumentos de  $(N \cdot I_{cc})/I_h$ .

Por lo tanto estos puntos determinan una nueva curva (envolvente) a lo largo de la cual pueden marcarse los valores de  $I_a/I_h$  óptimos (Figura 7-27).

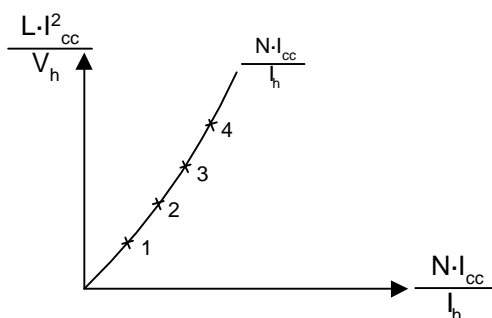


Figura 7-27.

### 7.1.5.1 Proyecto de inductores con el método de Hanna

#### 7.1.5.1.1 Datos

1. Valor de inductancia deseada  $L$ .
2. Corriente continua circulante  $I_{cc}$ .
3. Tensión alterna aplicada  $E_{ca}$ .
4. Frecuencia de trabajo  $f$ .

#### 7.1.5.1.2 Desarrollo

1. **Determinación de la sección del material magnético  $S_h$ .**

Se parte de

$$\hat{I}_{ca} = \frac{\hat{E}_{ca}}{V \cdot L}$$

luego

$$P = \frac{\hat{E}_{ca} \cdot \hat{I}_{ca}}{2}$$

y finalmente

$$S_h = 1,2 \text{ a } 2 \cdot \sqrt{P}$$

2. **Elección de la laminación y determinación de  $a$ ,  $A_p$  y  $l_h$ .**

Se predetermina  $a$ :

$$a \approx \sqrt{\frac{S_h}{0,95}}$$

Se busca una laminación apropiada y se determina el área real  $a$ , el apilado  $A_p$ , y la longitud del circuito magnético  $l_h$ .

Con esto queda fijado el  $V_h$ :  $V_h = S_h \cdot l_h = 0,95 \cdot A_p \cdot a \cdot l_h$ .

3. **Determinación de  $N$  y  $I_a$ .**

Se calcula  $L \cdot I_{cc}^2$  y con este dato se entra en las curvas hasta obtener el  $N$  mínimo, o sea, hasta encontrar la envolvente de todas las curvas que esta graduada en valores de  $I_a/I_h$  óptimos.

4. **Determinación de la sección del conductor.**

La corriente eficaz a través del devanado será:

$$I_{ef} = \sqrt{I_{ca}^2 + I_{cc}^2}$$

y tomando una densidad de corriente admisible  $J_{adm}=2$  a  $3[\text{Amp}/\text{mm}^2]$  se determina la sección del alambre a utilizar:  $S_c=I_{ef}/J$

**5. Análisis de la sección de la ventana.**

Se realiza el cálculo de la distribución del devanado en la ventana en forma similar a otros inductores.

**6. Análisis de la sobreelevación de temperatura.**

Se debe verificar la sobreelevación de temperatura del devanado y del núcleo.

### 7.1.6 Método las curvas M

En el método de Hanna no se tuvieron en cuenta las verificaciones de la amplitud de la inducción magnética ( $\Delta B$ ) provocadas por la corriente alterna, lo cual conduce a un diseño antieconómico.-

En el método que se pasa a desarrollar, se tendrán en cuenta esas variaciones.-

Se parte de la formula:

$$L = \frac{0,4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S_h}{\ell_h} \cdot \frac{1}{\frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h}} \cdot 10^{-8} [\text{Hy}]$$

Multiplicando ambos miembros por  $I_{cc}^2$  y multiplicando numerador y denominador del segundo miembro por  $\ell_h$ , y además, teniendo en cuenta que  $S_h \cdot \ell_h = V_h$ , se obtiene:

$$\frac{L \cdot I_{cc}^2}{V_h} = \frac{0,4 \cdot p \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h}} \cdot \frac{N^2 \cdot I_{cc}^2}{\ell_h^2}$$

por simplicidad se hace:

$$K = \frac{L \cdot I_{cc}^2}{V_h}; \quad C = 0,4 \cdot p \cdot 10^{-8}; \quad F^2 = \frac{N^2 \cdot I_{cc}^2}{\ell_h^2}$$

y sabiendo que:

$$\frac{1}{\frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h}} = m_0$$

se obtiene:

$$K = C \cdot m_0 \cdot F^2$$

Se observa en las fórmulas precedentes, que para un valor de  $F$  dado, el volumen  $V_h$  del hierro será mínimo cuando  $\mu_0$  sea máxima.-

Por lo tanto el problema es diseñar un inductor con un entrehierro de longitud tal que para una amplitud de inducción  $B_{pico}$  a  $pico$  dada se tenga una permeabilidad  $\mu_0$  máxima, de modo que se obtenga el valor de inducción deseado  $L$ , empleando la menor cantidad de hierro posible.-

Para obtener el valor  $\mu_0$  máximo, se fija un valor de  $\Delta B$  y se consideran distintos valores de  $H_{cc}$ . Bajo estas condiciones, y con las curvas de la Figura 7-28 se realizan las dos siguientes etapas:

- Se toman las curvas de  $\mu_\Delta$  en función de  $\Delta B$  y  $H_{cc}$ , y con el valor de  $\Delta B$  fijado, se obtiene una serie de valores de  $\mu_\Delta$  para los distintos valores de  $H_{cc}$ .
- Se toma la curva de magnetización del material magnético y fijando un campo magnético continuo  $H_{cc}$  total en el circuito magnético total (hierro + entrehierro), y considerando los distintos valores de  $H_{cc}$ , se obtienen los distintos valores de  $B_i$ , con los que se obtienen los  $I_a/I_h$  que corresponden a los valores de la pendiente de la recta negativa, modificada, del entrehierro.

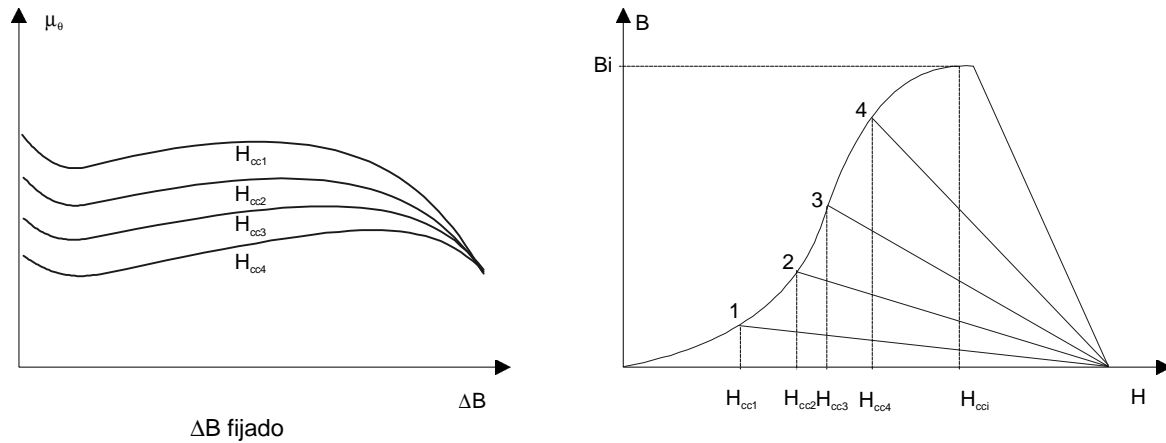


Figura 7-28

Hay que recordar que:

$$\frac{\ell_a}{\ell_h} = \frac{H_{\text{total}} - H_i}{B_i}$$

donde:

$B_i$  = inducción magnética continua presente en el circuito magnético.

Con los valores obtenidos, se pueden calcular los valores de  $\mu_0$  para cada par de valores  $\mu_\Delta$  y  $I_a/I_h$ , mediante la formula:

$$m_0 = \frac{1}{\frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h}}$$

Estos valores de  $\mu_0$  pueden graficarse en función de  $B_i$  llevando como parámetro a  $H_{eq,cc}$  y graduando las curvas así obtenidas en valores de  $I_a/I_h$ .

Tomando otros valores del campo magnético continuo ( $H_{\text{total } 2}$ ,  $H_{\text{total } 3}$ , ..., ) y el mismo  $\Delta B$ , se repite el calculo anterior obteniéndose el gráfico de la Figura 7-29.-

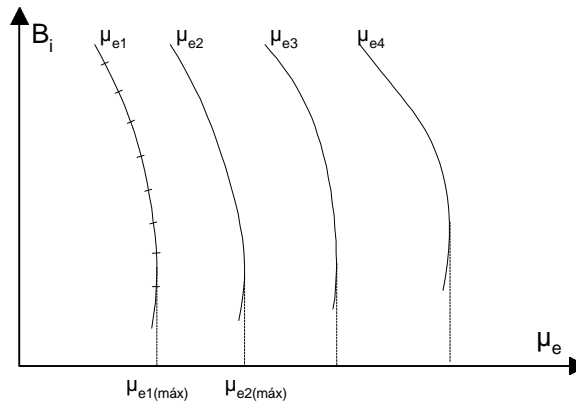


Figura 7-29

De este gráfico pueden obtenerse para cada  $H_{\text{total}}$ , el  $\mu_0$  máximo y la correspondiente relación  $I_a/I_h$ ; valores que se grafican llevando como parámetro a  $I_a/I_h$ .

Se observa que:

$$H_{cc \text{ total}} = \frac{0,4 \cdot p \cdot N \cdot I_{cc}}{I_h} = 0,4 \cdot p \cdot F$$

De modo que si se varía la escala de ordenada de la figura, en el factor  $0,4 \cdot \pi$  se obtiene la curva de  $F$  en función de  $\mu_0$  máximo.-

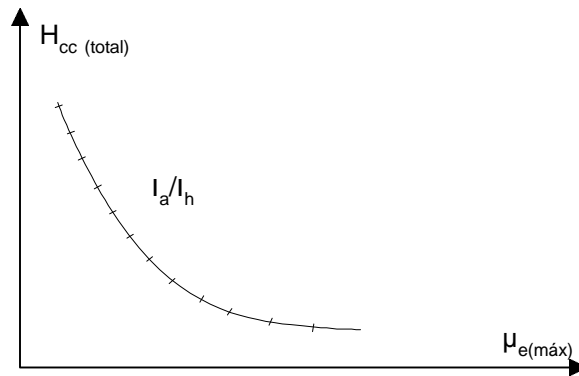


Figura 7-30

Ahora bien, se sabe que  $K = C \cdot \mu_0 \cdot F^2$ , de modo que si a cada valor de  $F$  (correspondiente el gráfico anterior se los eleva al cuadrado y se los multiplica por  $C$  y por el valor de  $\mu_0$  máximo correspondiente al punto en cuestión, se obtienen valores de  $K$  que pueden graficarse obteniéndose la curva de la Figura 7-31.-

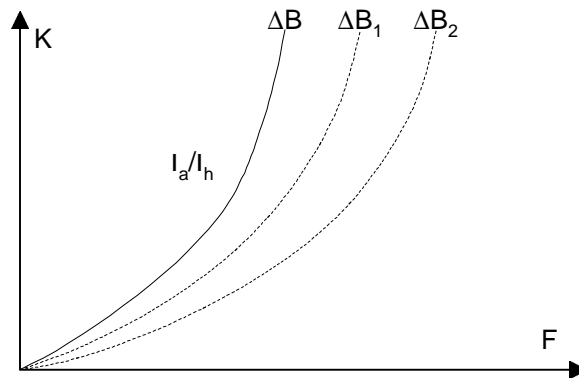


Figura 7-31

Hasta el momento se ha considerado un solo valor fijo de  $\Delta B$  a continuación se repite el procedimiento para otros valores de  $\Delta B$ , obteniéndose una familia de curvas  $K-F$ , cada una de las cuales tendrá como parámetro  $\Delta B$ , y estará graduada en valores de  $I_a/I_h$ .-

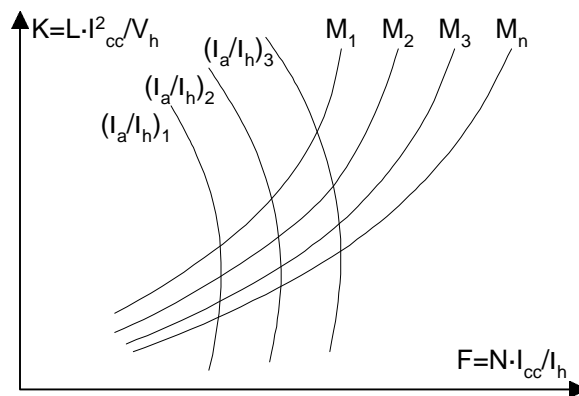
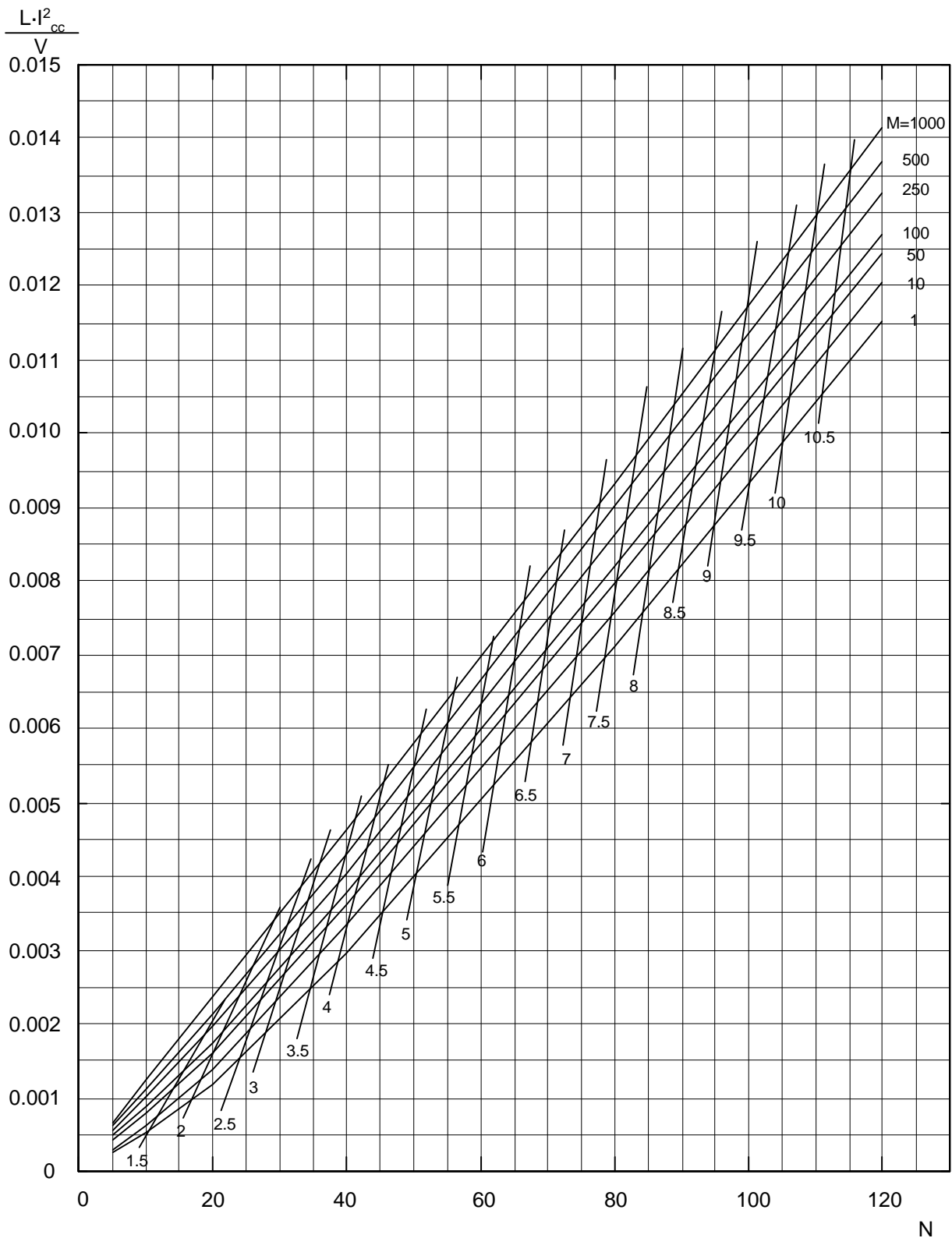


Figura 7-32

Con todo, estas curvas no nos son prácticas para realizar el diseño, pues para utilizarlas debe conocerse el valor  $\Delta B$  que depende de  $N$  a través de la expresión:

$$\Delta B = \frac{\hat{E} \cdot 10^{-8}}{2 \cdot p \cdot f \cdot S_h \cdot N}$$

y justamente el número de espiras es una de las incógnitas del problema del diseño.-



**Figura 7-33. Curvas M. Inductores con corriente alterna y continua.**

Para eliminar este problema, se multiplican ambos miembros de la última expresión por:

$$F = \frac{N \cdot I_{cc}}{\ell_h}$$

obteniéndose la expresión:



$$M = \Delta B \cdot F = \frac{\hat{E} \cdot I_{cc} \cdot 10^{-8}}{V_h \cdot V}$$

que va a permitir trazar una nueva familia de curvas que posibilitara la solución del problema.-

Para trazarlas se calcula en cada uno de los puntos de las curvas, el correspondiente valor de **M**, y se unen, mediante curvas, los puntos del plano **K-F** que posean los mismos valores del parámetro **M**.-

Asimismo se unen los puntos que tengan los mismos valores de la relación  $I_a/I_h$ .-

Se obtiene con esto, la familia de curvas de la Figura 7-32.-

#### **7.1.6.1 Proyecto de inductores con el método de las curvas M**

##### **7.1.6.1.1 Datos**

1. Valor de la inductancia deseada **L**.
2. Corriente continua circulante **I<sub>cc</sub>**.
3. Tensión alterna aplicada **E<sub>ca</sub>**.
4. Frecuencia de trabajo **f**.

##### **7.1.6.1.2 Desarrollo**

1. **Determinación de la sección del material magnético S<sub>h</sub>.**

Se parte de

$$\hat{I}_{ca} = \frac{\hat{E}_{ca}}{V \cdot L}$$

luego

$$P = \frac{\hat{E}_{ca} \cdot \hat{I}_{ca}}{2}$$

y finalmente

$$S_h = 1,2 \text{ a } 2 \cdot \sqrt{P}$$

2. **Elección de la laminación y determinación de a, A<sub>p</sub> y I<sub>h</sub>.**

Se predetermina **a**

$$a \approx \sqrt{\frac{S_h}{0,95}}$$

Se busca una laminación apropiada y se determina el área real **a**, el apilado **A<sub>p</sub>** y la longitud del circuito magnético **I<sub>h</sub>**. Con esto queda fijado el  $V_h = S_h \cdot I_h = 0,95 \cdot A_p \cdot a \cdot I_h$ .

3. **Calculo de  $L \cdot I_{cc}^2 / C_h$  y de M.**

$$M = \frac{\hat{E} \cdot I_{cc} \cdot 10^{-8}}{V \cdot V_h}$$

4. **Determinación de N y I<sub>a</sub>.**

Se entra al gráfico de las curvas **M** con el valor de ordenadas calculado en (3) hasta interceptar a la curva que tenga como parámetro el valor de **M** obtenido.

De la abscisa correspondiente a este punto, se despeja:

$$N = \frac{F \cdot I_b}{I_{cc}}$$

Además de la curva de  $I_a/I_h$  que pasa por el punto determinado, se despeja la longitud la del entrehierro a utilizar.

**5. Determinación de la sección del conductor.**

La corriente eficaz a través del devanado será  $I_{ef}^2 = I_{cc}^2 + I_{ca}^2$  y tomando una densidad de corriente admisible  $J_{ad} = 2$  a  $3 [Amp/mm^2]$ , se determina la sección del alambre a utilizar.

**6. Análisis de la sección de la ventana.**

Se realiza el calculo de la distribución del devanado en la ventana, en forma similar o otros inductores.

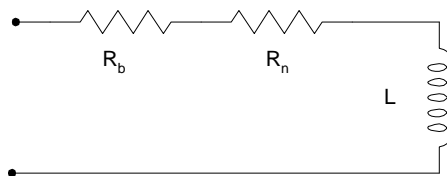
**7. Análisis de la sobreelevación de temperatura.**

Se debe verificar la sobreelevación de temperatura, del devanado y del núcleo.

**7.1.7 Proyecto de inductores de elevado Q**

Cuando se necesitan inductores de  $Q$  elevado, como por ejemplo para filtros de audiofrecuencias, circuitos tanques, etc.; se puede plantear una metodología de calculo particular.-

Se parte de conocer el valor deseado de inductancia, la tensión y frecuencia de trabajo y además el tamaño máximo admisible y en base a estos datos, se desea poder elegir la laminación adecuada y poder calcular el entrehierro y el número de vueltas, para obtener el máximo  $Q$ .-



**Figura 7-34. Esquema equivalente de inductor.**

Se considera el esquema eléctrico de la Figura 7-34 equivalente de un inductor, esquema que si bien no es el mas general, es el que mejor se presta para el análisis simplificado que se hará.-

$R_n$  representa la resistenciencia equivalente a las perdidas en el núcleo, y puede expresarse como:

$$\text{Ec. 7-17} \quad R_n = \frac{W}{I}$$

siendo:

**W:** las perdidas en vatio en el núcleo.

**I:** la corriente en amperios que circula por la bobina.

Las perdidas totales en el núcleo (para una determinada frecuencia) están dadas por:

$$\text{Ec. 7-18} \quad W = K \cdot B^2 \cdot P$$

siendo:

**K:** una constante que depende de la frecuencia y del espesor de las chapas.

**B:** la inducción máxima en Gauss.

**P:** el peso del núcleo en Kg.

Esta ecuación es valida para un amplio rango de variación de **B**, y para distintos frecuencias, aunque el exponente 2 tiende a disminuir por debajo de los 500Hz y a aumentar por arriba de los 5000Hz (para los hierro-silicio corrientes).-

Si el inductor tiene un  $Q > 10$ , se puede escribir sin error que:

$$\text{Ec. 7-19} \quad I = \frac{E}{2 \cdot p \cdot f \cdot L}$$

y llevando la Ec. 7-18 y la Ec. 7-19 a la Ec. 7-17, se tiene:

$$\text{Ec. 7-20} \quad R_n = \frac{K \cdot B^2 \cdot P}{E^2} \cdot (2 \cdot p \cdot f \cdot L)^2$$

Por otra parte,  $R_b$  representa la resistencia óhmica del devanado, que puede expresarse como:

$$R_b = r \cdot \frac{N \cdot t}{S} [\Omega]$$

siendo:

$N$ : número de vueltas.  
 $t$ : longitud de la espira [cm].  
 $S$ : sección de la espira [cm<sup>2</sup>].  
 $\rho$ : resistividad del cobre.

Llamando  $F$  a la sección de la ventana, y considerando un factor de relleno de 0,3 se tiene:

$$S = \frac{0,3 \cdot F}{N}$$

y teniendo en cuenta que (para el cobre)  $\rho = 1,73 \cdot \pi \cdot 10^{-6} [\Omega/\text{cm}]$

$$R_b = \frac{N^2 \cdot t}{0,3 \cdot F} \cdot 1,73 \cdot 10^6 [\Omega]$$

y como:

$$N = \frac{E \cdot 10^8}{4,44 \cdot B \cdot f \cdot S_h}$$

nos queda:

$$R_b = \frac{30 \cdot E^2 \cdot t \cdot 10^8}{F \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot S_h}$$

Ahora bien; el  $Q$  del inductor viene dado por:

$$Q = \frac{2 \cdot p \cdot f \cdot L}{R_n + R_b}$$

y el máximo corresponde a un mínimo de  $R_n + R_b$ .-

Analizando las condiciones planteadas, y las expresiones de  $R_n$  y  $R_b$  se ve que, para una determinada laminación, la única variable es  $B$  de manera que derivando la suma, e igualando a cero, se puede obtener la condición buscada; pero examinando las mencionadas expresiones, se ve que  $R_n$  es directamente proporcional a  $B^2$  mientras que  $R_b$  es inversamente proporcional a  $B^2$  de modo que el valor mínimo de la suma será aquel para el cual  $R_n = R_b$ , o sea

$$B = 94 \cdot \frac{E}{f} \cdot \frac{1}{\sqrt{S_h \cdot L}} \cdot \sqrt[4]{\frac{t}{F \cdot P \cdot K}}$$

Este será el valor de  $B$  a que deberá trabajar el núcleo, y con auxilio de la ecuación de  $N$  se puede determinar inmediatamente el número de vueltas necesario para obtener este valor de inducción, previamente, en base al tamaño máximo admisible, y a criterios de diseño se debe elegir la laminación y el apilado, obteniéndose la sección del hierro  $S_h$ , la sección de la ventana  $F$  y el peso del núcleo  $P$ .-

El alambre a utilizar se determina, teniendo en cuenta que:

$$S = \frac{0,3 \cdot F}{N}$$

o bien se obtiene el diámetro de:

$$D_c = 6,3 \cdot \sqrt{\frac{F}{N}} \text{ [mm, Fen cm]}$$

y la longitud  $\ell_a$  de:

$$L = \frac{0,4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S_h \cdot 10^{-8}}{\ell_h \cdot \left( \frac{1}{m_\Delta} + \frac{\ell_a}{\ell_h} \right)} \Rightarrow \ell_a = \left( \frac{0,4 \cdot p \cdot N^2 \cdot S_h \cdot 10^{-8}}{L} \right) - \left( \frac{\ell_h}{m_\Delta} \right)$$

A  $\mu_\Delta$  se lo puede obtener de las curvas de permeabilidad incremental para  $H_{cc}=0$ , y con el valor de  $B$  obtenido antes.-

Si los valores obtenidos satisfacen las necesidades, el proyecto queda terminado, de lo contrario puede repetirse el cálculo con valores mayores de apilamiento o laminaciones mas grandes.-

El problema principal para la aplicación de este método es que normalmente no se conoce  $k$  y hay que determinarlo, pero esta determinación no ofrece dificultades.-

Se parte de un inductor de prueba realizado sobre un núcleo del material en cuestión, y con un numero de vueltas conocido.-

Se determina, para distintas tensiones y frecuencias, el valor de la inductancia y el  $Q$ ; además con un voltímetro se mide la tensión sobre el inductor.-

Con estos valores se pueden obtener:

$$B = \frac{E}{4,44 \cdot N \cdot f \cdot S_h} \cdot 10^{-8}$$

$$R_b + R_n = \frac{2 \cdot p \cdot f \cdot L}{Q}$$

$$\ell_a = \frac{E}{2 \cdot p \cdot f \cdot L}$$

y como además  $R_b$  se puede determinar, o directamente medir, se pueden calcular las perdidas en el núcleo:

$$W = I^2 \cdot R_n$$

y conociendo el peso del núcleo, obtener  $K$

$$K = \frac{W}{B^2 \cdot p}$$

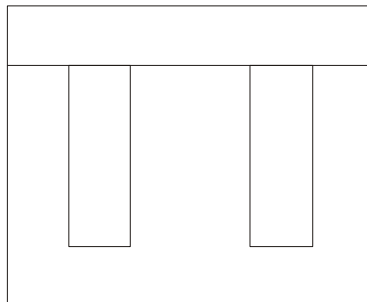
Es interesante trazar la curva de  $K$  en función de la frecuencia, la que en papel doble logarítmico es prácticamente una recta.-

## 8 CAPÍTULO VIII

### 8.1 Transformadores

#### 8.1.1 Transformadores con núcleo de hierro laminado

Los transformadores con núcleo de hierro laminado pueden agruparse en los llamados transformadores de alimentación (llamados también transformadores de poder) y los llamados transformadores de audiofrecuencia.-



**Figura 8-1. Núcleo acorazado.**

Los transformadores de alimentación, funcionan conectados a la red (220V c.a.), por lo tanto trabajan a frecuencia constante, y su cálculo es relativamente sencillo. Los transformadores de audio trabajan a frecuencia variable (entre 15 a 30KHz o mas), y su cálculo es mas complicado.-

Generalmente estos transformadores son de tamaño reducido y la construcción mas corriente es la del tipo **acorazado** (Figura 8-1). Se suelen utilizar laminaciones normalizadas, pero en algunos casos, estas no son recomendables y hay que reemplazarlas por otras similares pero con mayor superficie de ventana.-

Pueden también utilizarse núcleos a columna, núcleos integrados o núcleos contruidos con una cinta continua de material magnético arrollado en forma de espiral, etc..-

El espesor de las laminaciones es de 0,35 a 0,50mm para frecuencias industriales, y de valores menores para frecuencias mas elevadas.-

Las laminas se agrupan en forma alternada (circuito magnético con junta) cuando no hay circulación de corriente continua y dejando un entrehierro definido (circuito magnético con entrehierro) cuando hay circulación de corriente continua, superpuesta a una alterna.-

El montaje de los transformadores se realiza, en general de tres formas distintas:

1. Directamente al aire.
2. Con tapas laterales, ya sea una o dos.
3. En cajas cerradas.

Cada una de estas construcciones tienen sus ventajas e inconvenientes, y deben considerarse los siguientes puntos para decidir la elección de alguna de ellas:

- A. Clima:** En climas húmedos, y especialmente los tropicales el cobre se corroe fácilmente debido a los efectos de electrólisis. Los transformadores que llevan alambre fino (<0,12) se conservan mejor si se los cierra completamente (no se excluye la impregnación).
- B. Sobreelevación de temperatura:** El agregado de tapas, o la colocación del transformador en cajas impone obstáculo a la disipación del calor. Los transformadores grandes se comportan mejor se están completamente abiertos.
- C. Espacios:** El agregado de caja o tapas requiere generalmente disponer de mayor lugar que si se monta el transformador directamente sobre un chasis.

- D. Tensión:** En los transformadores de mas de 1000 Volts, generalmente la colocación de tapas añade dificultades a la aislacion de los bobinados. Cuando se utiliza aceite, es necesario un tanque, y por consiguiente, este ya suministra una protección.
- E. Presentación y protección:** Los transformadores con tapas o cajas, tienen mejor apariencia que los de tipo abierto, y además ofrecen una mayor protección al manipuleo.

Los materiales para el núcleo han sido vistos en el capítulo correspondiente.-

En general debe evitarse trabajar con inducciones próximas a la saturación, porque en ese caso, la corriente magnetizante es grande, la regulación es generalmente pobre, el rendimiento es bajo, las perdidas aumentan y en el caso del transformador de audio, la deformación es seria.-

En general se aconseja mantenerse entre 9000 y 12000 líneas para hierros al silicio, por debajo de 10000 para el **hipernik**, y no pasar las 5000 a 6000 líneas para los materiales de alta permeabilidad (**Mu-metal**, **permalloy**, etc.). En algunos materiales, la máxima densidad de flujo admisible es mucho menor, por lo que deben consultarse los catálogos de los fabricantes.-

La densidad de corriente en los bobinados suele tomarse entre 2 y 3 amperes/mm<sup>2</sup>.-

Este dato es tentativo para un primer calculo; la sobreelevación de temperatura, regulación, o algún otro criterio del funcionamiento definen la elección final.-

El espacio ocupado por el alambre depende de la aislación del mismo y de la sección de cobre.-

En secciones pequeñas, el factor de aprovechamiento puede ser bajo, debido a la relación que existe entre la sección del cobre y la superficie ocupada por el aislante.-

Generalmente se obtiene un buen aprovechamiento del espacio usando alambre esmaltado, y aislación de papel entre capas. El espesor del papel depende de la tensión entre capas, siendo usual tomar 200V por cada 1/10 de mm de espesor de papel.-

Cuando la tensión es muy pequeña, la disminución del espesor de papel esta limitada por la rigidez mecánica necesaria para producir capas parejas, y un bobinado compacto.-

En la actualidad los materiales plásticos están reemplazando al papel como aislante. Conviene señalar al respecto al **Mylar** y al **Teflón** como materiales muy recomendables.-

El aprovechamiento de una ventana se da generalmente en base al **Factor de espacio** que es la relación entre la superficie útil del alambre y la superficie real ocupada.-

Este factor depende fundamentalmente de la forma en que se realiza el bobinado (a mano, en maquina simple o en maquina múltiple).-

Para el diseño de transformadores de alimentación, en una primera verificación puede suponerse que el 30% de la superficie de la ventana esta ocupada por el cobre, la misma consideración es valida para transformadores de audio, de construcción normal y con alambres de diámetros superiores a 0,18 a 0,15mm.-

Transformadores para tensiones elevadas o transformadores de audio, con devanados subdivididos, conducen generalmente a un aprovechamiento menor.-

La colocación de la aislación y el soldado de los terminales constituye tal vez uno de los mas importantes pasos en la fabricación de una bobina. Si estas se hacen de a una, los terminales pueden colocarse mientras se halla la bobina en la maquina. El terminal que corresponde al principio debe aislarse convenientemente, colocando papel o cinta sobre el mismo, y luego bobinando encima. El mismo proceso se sigue en las salidas intermedias si las hubiere. El terminal final debe anclarse por medio de cinta, ya que no hay vueltas de alambre que lo sujeten.-

Cuando se trabaja con maquinas múltiples, es forzoso colocar los terminales una vez hechas las bobinas.-

En este caso debe dejarse longitud suficiente de alambre en el comienzo como para llegar a la parte exterior de la bobina.-

Cuando las tensiones sean del orden de los 500V o mas, debe cuidarse de dejar suficiente aislación entre terminales, además de cuidar la solidez mecánica del anclado para soportar el manipuleo sin romperse.-

Luego que una bobina ha sido terminada, debe impregnarse en algún líquido aislante que endurezca al secar. Esto se hace por varias razones:

1. Protege al alambre de posibles movimientos y daños mecánicos.
2. Impide la entrada de humedad y materias extrañas que pueden corroer el alambre o dañar la aislación.
3. Aumenta la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes.
4. Ayuda a la disipación de calor en la bobina.

La mejor impregnación se hace al vacío, pues permite extraer al aire del interior de la bobina. Un secado adecuado debe ser hecho previo a la impregnación.-

Cuando la temperatura de funcionamiento es baja, pueden utilizarse la cera y la parafina, pero por arriba de 60°C deben utilizarse barnices.-

Debe procurarse que los barnices que se utilicen no ataquen los esmaltes del alambre.-

En los transformadores, el aire alrededor de las bobinas y terminales, facilita la formación de corona. Para reducir esta tendencia, las cajas que contienen transformadores se suelen llenar de algún componente asfáltico no ionizable que reemplaza al aire. El mismo procedimiento se sigue a veces en los transformadores corrientes para evitar la sujeción mecánica del núcleo a la carga. Esto es admisible si la máxima temperatura de trabajo es inferior a la de ablandamiento del compuesto.-

El dato usual para la rigidez dieléctrica (suministrado por los fabricantes) es la tensión de ruptura, en valor eficaz, a 50 ciclos para un ensayo de un minuto de duración. Sin embargo, no es posible trabajar con aislantes orgánicos cerca de este punto debido a la estructura celular de los mismos.-

Aun cuando los aislantes de este tipo sean tratados con barniz, pueden existir pequeños intersticios de aire, los cuales se ionizan y forman coronas a tensiones mucho menores que la de ruptura. Con estos aislantes el diseño debe ser regulado por la resistencia a la formación de corona, en un periodo prolongado de aplicación de la tensión. Por ejemplo, una tela tratada de 0,5mm puede soportar cerca de 10000V en ensayo de un minuto. Sin embargo la corona comienza a 1200V aproximadamente, y el funcionamiento a tensiones superiores provocara su perforación al cabo de un par de semanas. Es, por lo tanto, mucho mas razonable calcular un espesor de aislante al limite por efecto de corona que en base a una fracción de la tensión de ruptura en un ensayo de un minuto.-

Los aislantes inorgánicos pueden trabajarse mucho mas próximos al limite de la rigidez dieléctrica. Para la mica se puede tomar usualmente 400 volts eficaces por cada 1/10 de mm de espesor.-

### **8.1.2 Transformadores de alimentación**

Son pequeños transformadores que normalmente constan de un primario, y uno o varios secundarios. El primario se conecta a la red de canalización (de tensión y frecuencia constante), y uno o más de los secundarios está corrientemente acoplado a un circuito rectificador cuyas características influyen en el funcionamiento del transformador.-

Los datos para el diseño de estos transformadores son normalmente la tensión del primario y las tensiones y corrientes de cada devanado secundario. En el caso del secundario conectado a un circuito rectificador, la determinación exacta de ambos valores  $I_{cc}$  y  $E_{cc}$  sino también del circuito rectificador, del tipo de filtro, etc..-

A los fines del cálculo se considera que la carga sobre el secundario es puramente resistiva. En el proyecto de estos transformadores se pueden plantear tres problemas principales:

- La elección del circuito magnético.
- La determinación del número de vueltas de cada arrollamiento.

- La evaluación de la sección de los conductores.

El cálculo se encara partiendo de la ecuación fundamental:

$$\text{Ec. 8-1} \quad E_{\text{ef}} = 4,44 \cdot f \cdot B \cdot N \cdot S_h \cdot 10^{-8} [\text{V}]$$

en la que:

**N**: número de espiras del primario.

**E<sub>ef</sub>**: la tensión eficaz aplicada al primario.

**f**: es la frecuencia de la tensión aplicada al primario.

**B**: es la densidad de flujo en Gauss.

**S<sub>h</sub>**: es la sección del núcleo en cm<sup>2</sup>.

Esta ecuación admite infinitas soluciones pues **B**, **N**, y **S<sub>h</sub>** son incógnitas. Se restringe el número de soluciones dando valores a algunas de estas incógnitas.-

Se comienza fijando el valor de **B**; evidentemente este valor no puede ser arbitrario pues un **B** muy elevado representa pérdidas muy elevadas en el hierro. **B** tiene un límite fijado por el aumento de temperatura permisible en el hierro, es decir que desde el punto de vista de las pérdidas, conviene un **B** bajo; pero un **B** bajo significa un producto **N·S<sub>h</sub>** alto, es decir, mayor cantidad de cobre o de hierro, por lo tanto desde un punto de vista económico, conviene un **B** grande.-

Normalmente los valores de **B** están comprendidos entre 8000 y 12000 Gauss (valor pico), dependiendo fundamentalmente del material a emplear.-

El valor definitivo está supeditado a la verificación por sobreelevación de temperatura **Δt**.-

En los casos de trabajo intermitente (por ej. lapsos de trabajo no superiores a 5 minutos, y lapsos de descanso no inferiores a 5 minutos) se consigue que **Δt** no pase de la mitad de **Δt** de funcionamiento continuado, y por lo tanto se puede trabajar con valores de **B** más elevados.-

Elegido el valor de **B**, queda fijado en la Ec. 8-1 el valor del producto **N·S<sub>h</sub>**, y es interesante destacar que a un valor grande de uno de ellos corresponde un valor chico del otro y viceversa.-

El próximo paso es la elección de la sección óptima del núcleo de hierro **S<sub>h</sub>**, al elegir un valor de **S<sub>h</sub>** implícitamente se elige la laminación, y queda fijado el circuito magnético. **S<sub>h</sub>** puede variar dentro de ciertos límites, a un **S<sub>h</sub>** grande corresponde un **N** chico y viceversa.-

En la elección de la sección **S<sub>h</sub>** pueden primar aspectos técnicos, económicos, de diseño, etc..-

Desde un punto de vista técnico puede ser necesario una buena regulación, es decir baja caída interna en el devanado, para lo cual es necesario reducir la resistencia del bobinado, en este caso conviene un **S<sub>h</sub>** grande y un **N** chico.-

Desde un punto de vista económico, un aumento excesivo de la sección de hierro **S<sub>h</sub>** puede traer aparejado un aumento grande del costo, no compensado por la disminución del costo del cobre.-

Desde el punto de vista del uso que va a tener la unidad, puede definirse el valor de **S<sub>h</sub>**; si la misma va a trabajar durante grandes intervalos de tiempo sin carga en el secundario, son menos importantes las pérdidas en el cobre que en el hierro, y conviene que **S<sub>h</sub>** sea chica.-

Desde el punto de vista del diseño, el volumen de la unidad puede llegar a ser el que defina el valor de **S<sub>h</sub>**.-

La elección del valor de **S<sub>h</sub>** puede efectuarse con la ayuda de la siguiente expresión:

$$S_h = K \cdot \sqrt{P}$$

en la cual:

**P**: es la potencia del secundario [V·A].

**K**: factor que varía entre 1,2 y 2.

Se suele usar de 1,2 a 1,4 en dispositivos corrientes como radorreceptores para el hogar, etc.; y 2 en dispositivos más elaborados.-



Una vez fijado el valor de la sección del hierro  $S_h$ , y suponiendo, en una primera estimación, que esta sección sea cuadrada y con un factor de apilamiento de 0,95, se obtiene el valor de  $a$  de la ecuación  $S_h = 0,95 \cdot a^2$  donde:

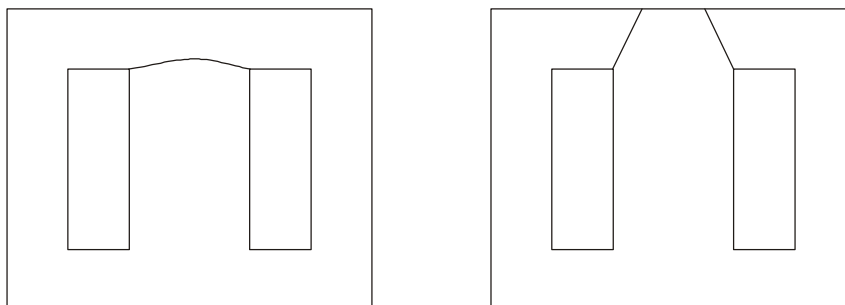
$$a = \sqrt{\frac{S_h}{0,95}}$$

Con este valor de  $a$  se elige una laminación cuya rama central tenga, aproximadamente este valor, y una vez elegida la laminación se tiene el valor definitivo de  $a$ , y se puede determinar el apilado.-

$$S_h = 0,95 \cdot a \cdot A_p$$

$$A_p = \frac{S_h}{0,95 \cdot a}$$

Hay que tener en cuenta que el apilado debe estar comprendido entre 1 y 1,5 de  $a$ .-



**Figura 8-2. Laminaciones especiales.**

Se suelen usar laminaciones E-I, normalizados o no, o especiales como las de la Figura 8-2.-

La próxima etapa es la determinación (en primera aproximación) de los números de vueltas de cada arrollamiento.-

Fijados  $B$  y  $S_h$  de la Ec. 8-1 puede obtenerse  $N$  que es el número de vueltas del primario  $N_1$ .-

Recordando que  $E_1$  y  $E_2$  son datos y aplicando la relación de transformación

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_2}{E_1}$$

se determina  $N_2$  (o los  $N_2$ ).-

A continuación hay que determinar la sección de los conductores. Para esto es necesario conocer la corriente que circula por cada arrollamiento.-

La corriente  $I_2$  del secundario (o de los secundarios) es un dato.-

La corriente  $I_1$  del primario se puede calcular (en primera aproximación) partiendo de la potencia de secundario (o de los secundarios).-

$$W_2 = \sum E_2 \cdot I_2$$

teniendo en cuenta que:

$$W_1 = E_1 \cdot I_1 \cdot \cos j$$

y que:

$$W_1 = \frac{W_2}{h}$$

se puede despejar  $I_1$ :

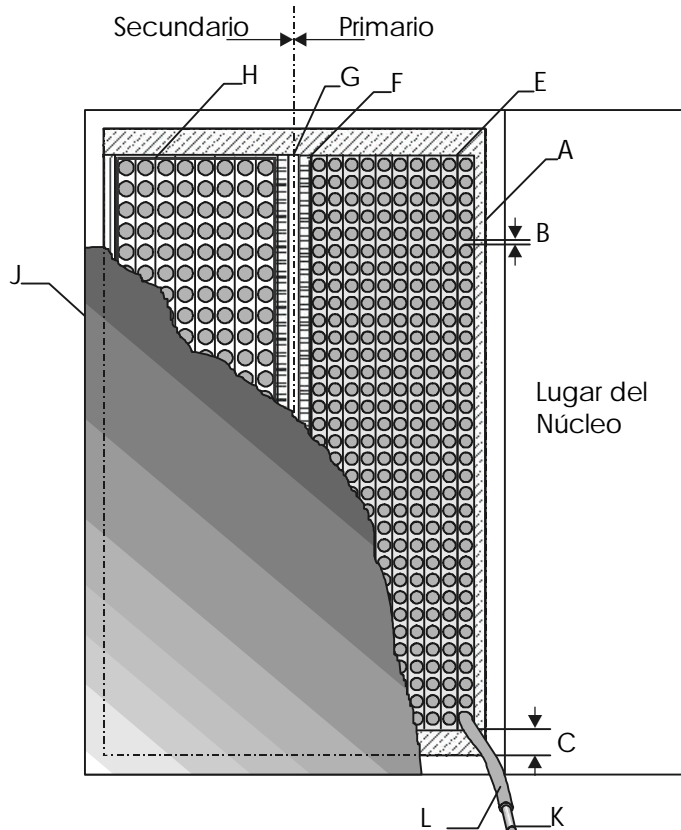
$$I_1 = \frac{W_2}{h \cdot \cos j \cdot E_1}$$

Ahora bien, el rendimiento  $\eta$  y el  $\cos\phi$  no se conocen hasta terminar el proyecto, por lo tanto se adopta en este caso un rendimiento de 0,9 y un  $\cos\phi$  de 0,9, obteniéndose:

$$I_1 = \frac{W_2}{0,81 \cdot E_1}$$

Conociendo la  $I_1$  y la  $I_2$  (o las  $I_2$ ) se pueden determinar la sección y el diámetro de los conductores, adoptando en primera aproximación una densidad de corriente  $J$  del orden de  $2A/mm^2$ .-

Puede variar entre 1 y  $3A/mm^2$ . Este valor de densidad de corriente es un valor guía, hay que ratificarlo o rectificarlo en función de un análisis final de sobreelevación de temperatura.-



**Figura 8-3. Esquema a escala de ventana, espiras y núcleo.**

Una vez elegida la laminación, y determinado el número de vueltas y el diámetro de los conductores, hay que determinar el lugar que ocupa cada devanado, constatar que las dimensiones de las ventanas sean lógicas, y calcular las longitudes de las espiras medias de cada devanado. Para todo esto, una solución de tipo gráfico es lo más cómodo, pero antes conviene una verificación previa; para esto se multiplican los números de vueltas por las secciones de los conductores, obteniéndose la sección del cobre que debe colocarse en las ventanas. Este valor debe ser del orden de 0,3 de la sección de la ventana; si es menor, sobra ventana y el diseño es antieconómico. Si es mayor, el número de espiras calculado no cabe en la ventana. En este caso puede, o cambiarse la laminación, o con la misma laminación, aumentar  $A_p$  con lo que aumenta  $S_h$ , y como consecuencia, disminuye  $N$ . Ahora bien, hay que tener en cuenta que el apilado debe estar comprendido entre 1 y 1,5 de  $a$ .-

A continuación conviene hacer el análisis gráfico. Se parte del esquema a escala de la ventana, y en el se van ubicando los arrollamientos, y las correspondientes aislaciones (Figura 8-3).-

En general, se ubica el primario más próximo al núcleo sobre un carrete  $A$  de 1 a 3mm de espesor. El espesor de 1mm se adapta para tensiones de hasta 220 voltios y 2mm hasta 400 voltios.-

Entre espiras se deja un espacio B para aislación del alambre mas 0,01mm para ser ocupado por el material de impregnación.-

En los bordes de cada capa, se deja un espacio C sin devanar. Este espacio será del 8 al 10% de la altura de la bobina con lo cual se pierden del 16 al 20% del espacio disponible, pero no debe ser menor que 3mm, ni mayor que 30mm; salvo en casos muy especiales.-

En transformadores de mayor importancia se ponen tiras de fibras D para rellenar el espacio.-

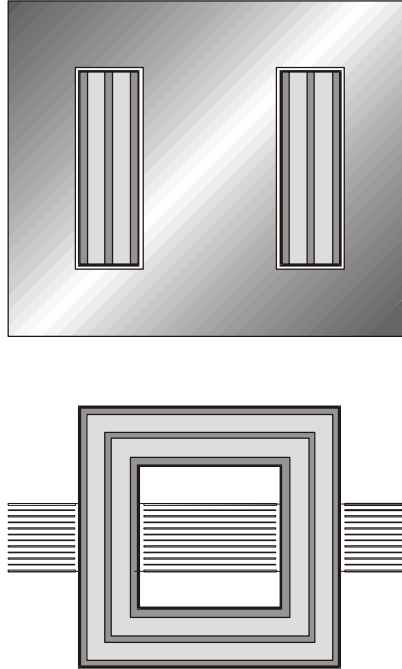


Figura 8-4.

Para aislar las capas adyacentes se dispone entre ellas un papel aislante E. El espesor de ese papel debe ser aproximadamente de 10 a 20% del diámetro del alambre, pero no menor que 0,02mm.-

Una vez fijado el espesor del papel, se debe verificar si resiste sin perforarse, la máxima tensión existente entre dos capas.-

Entre el primario y el secundario, se disponen varias capas de papel aislante F adaptando el espesor total de acuerdo a la tensión de trabajo del transformador.-

Frecuentemente se dispone también entre ambos devanados un pantalla electrostática G destinada a evitar que las perturbaciones de radiofrecuencia, eventualmente presentes en la tensión primaria, se transfieran capacitivamente al secundario. Esa pantalla consiste en una chapa de cobre de muy poco espesor (0,1mm) dispuesto de manera que sus bordes no estén en contacto eléctrico para evitar que actúen como una espira en corto circuito. Además debe estar munida de un conductor que permita conectarla a tierra.-

En el caso de usar pantalla electrostática, se debe prever suficiente aislación entre la pantalla y cada uno de los devanados adyacentes para que se pueda resistir la diferencia de potencial a la que están sometidas.-

Sobre el secundario se dispone una caja de protección de cartón H y sobre ella, en los transformadores de mayor importancia, distintas capas de tela J según la tensión de trabajo.-

Se deja un espacio entre la tela y el núcleo como tolerancia para deformaciones de la bobina.-

Los terminales de la bobina K se protegen y aíslan con un aislante flexible.-

En general se usa tubo de tela L impregnada en aceite o barniz, denominada **Espaguetti**.-

Teniendo así proyectado el transformador, se calcula la longitud de la espira media del primario y el secundario,  $l_{c1}$  y  $l_{c2}$  respectivamente, y con estos valores, la longitud total del alambre:

$$L_{c1} = N_1 \cdot l_{c1}$$

$$L_{c2} = N_2 \cdot l_{c2}$$

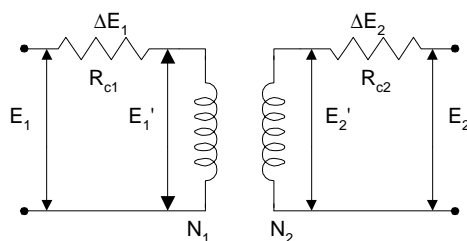
Se calculan las resistencias óhmicas de las bobinas, tomando de las correspondientes tablas los datos de la resistencia del alambre, que se encuentra normalmente expresada en  $[\Omega/\text{Km}]$ .

Resulta:

$$R_{c1} = L_{c1} \cdot r \cdot 10^{-5}$$

$$R_{c2} = L_{c2} \cdot r \cdot 10^{-5}$$

donde  $R_{c1}$  y  $R_{c2}$  están en  $[\Omega]$ ;  $L_{c1}$  y  $L_{c2}$  en  $[\text{cm}]$ ; y  $\rho$  en  $[\Omega/\text{km}]$ .-



**Figura 8-5. Esquema eléctrico del transformador.**

Con estos valores de  $R_{c1}$  y  $R_{c2}$  se calculan las caídas de tensión en las resistencias óhmicas del primario y secundario, donde  $\Delta E_1 = R_{c1} \cdot I_1$  y  $\Delta E_2 = R_{c2} \cdot I_2$ ; y puede plantearse el esquema eléctrico del transformador como muestra la Figura 8-5.-

Evidentemente cuando se calculó  $N_1$  y  $N_2$  no se tuvo en cuenta las resistencias internas de los arrollamientos y a esta altura del cálculo hay que efectuar las correcciones correspondientes, pues la tensión que verdaderamente establece el campo magnético en el primario y transfiere potencia al secundario es

$$E'_1 = E_1 - \Delta E_1$$

y la tensión necesaria en la bobina secundaria es:

$$E'_2 = E_2 + \Delta E_2$$

En el primario hay que disminuir las espiras  $N_1$  calculadas porque la caída reduce la tensión de trabajo. El número de espiras corregido del primario es:

$$N'_1 = N_1 \cdot \frac{(E_1 - \Delta E_1)}{E_1}$$

En el secundario hay que aumentar el número de las espiras calculadas porque se requiere aumentar la tensión para compensar la caída en la resistencia óhmica de la bobina secundaria. El número de espiras corregido, del secundario es:

$$N'_2 = N_2 \cdot \frac{(E_2 + \Delta E_2)}{E_2}$$

En el caso de que exista un solo secundario, se pueden efectuar las correcciones, de modo que afecten solamente al devanado, rectificando la cantidad de espiras del primario o del secundario. Entre estos límites es posible también realizar correcciones parciales en un devanado, haciendo el resto en el otro.-

Teniendo los números de espiras corregidas, se calculan las longitudes totales corregidas, y las resistencias corregidas.-

Se podrían corregir también las caídas  $\Delta E_1$  y  $\Delta E_2$ , pero en los casos prácticos, si no se prepara una producción en gran escala, no es necesario seguir con las correcciones, bastando la primera para obtener valores que se aparten muy poco de la realidad.-

Una vez conectado el transformador, puede calcularse realmente el rendimiento, el  $\cos\phi$  y con exactitud, la corriente  $I_1$  del primario.-

El rendimiento es igual al cociente entre la potencia que entrega el transformador y la que toma de la línea.-

$$h = \frac{W_2}{W_1} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

La potencia que entrega el transformador es igual a:

$$W_2 = E_2 \cdot I_2$$

y la potencia que toma de la línea es igual a:

$$W_1 = E_2 \cdot I_1 + P_{c1} + P_{c2} + P_h$$

siendo:

$P_{c1}$ : pérdidas en el cobre del primario.

$P_{c2}$ : pérdidas en el cobre del secundario.

$P_h$ : pérdidas en el hierro.

En un transformador bien diseñado,  $P_{c1} + P_{c2}$  debe ser igual a  $P_h$ . Las pérdidas en el cobre se obtienen directamente, conociendo las resistencias y corrientes de cada arrollamiento:

$$P_{c1} = R_{c1} \cdot I_1^2$$

$$P_{c2} = R_{c2} \cdot I_2^2$$

Para obtener las pérdidas en el hierro, hay que conocer primero el volumen del núcleo

$$V_h = S_h [\text{cm}^2] \cdot \ell_h [\text{cm}] \cdot 10^{-3} [\text{dm}^3]$$

luego conociendo la densidad del material  $\gamma$  (para el hierro en general  $\gamma = 7,5 \text{ Kg/dm}^3$ ) se obtiene el peso del núcleo:

$$K_h = V_h [\text{dm}^3] \cdot 7,5 [\text{kg/dm}^3]$$

y con el peso y las pérdidas (por Kg) para un determinado valor de frecuencia e inducción, se obtienen las pérdidas totales en el hierro

$$P_h = K_h \cdot \text{Pérdidas Específicas}$$

En cuanto a la determinación de la corriente  $I_1$ , conviene analizar la misma en vacío, y con carga.-

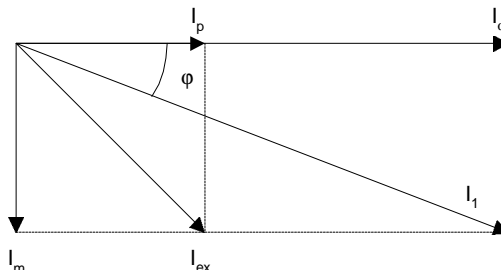


Figura 8-6. Diagrama vectorial del primario.

En vacío se tiene la llamada corriente de excitación  $I_{ex}$ . Esta corriente de excitación tiene una componente "wattada"  $I_p$ , y una componente "dewattada"  $I_m$ , conocida como corriente de magnetización.-

La componente  $I_p$  corresponde a las pérdidas en el hierro y a las pérdidas en el cobre del primario, y está en fase con  $E_1$ .-

$$I_p = \frac{P_h + P_{cl}}{E_l}$$

La componente  $I_m$  es la que establece el campo magnético en el núcleo, y está atrasada en  $90^\circ$  con respecto a la tensión aplicada.-

En la Figura 8-6 se tiene un diagrama vectorial de las corrientes en el primario de un transformador (en el caso del transformador cargado, se entiende carga puramente óhmica).-

Para determinar  $I_m$ , es necesario conocer las curvas  $B=f(H)$  y la curva de los Amp-espiras necesarios para forzar el flujo a través de una junta.

De la curva  $B=f(H)$ , conociendo el valor de la inducción con que se debe trabajar, se obtiene  $H$  [Oersted], y conociendo la longitud del circuito magnético  $l_h$ , se calculan los Amp-espiras necesarios para establecer la inducción  $B$  deseada.-

$$N \cdot I = \frac{H \cdot l_h [\text{cm}]}{1,25} = (\text{amp-vueltas})_h$$

Por otra parte, los Amp-espiras  $N \cdot I$  necesarios para establecer el flujo en el entrehierro, se obtienen, para cada junta, de la tabla de los Amp-espiras necesarios para forzar el flujo a través de la junta; el valor obtenido se multiplica por el número de juntas (en general 2), y se obtiene los Amp-espiras totales para establecer el flujo en las juntas  $(A \cdot V)_j$ .-

La corriente de magnetización va a ser igual a:

$$I_{m(\text{pico})} = \frac{(AV)_h + (AV)_j}{N}$$

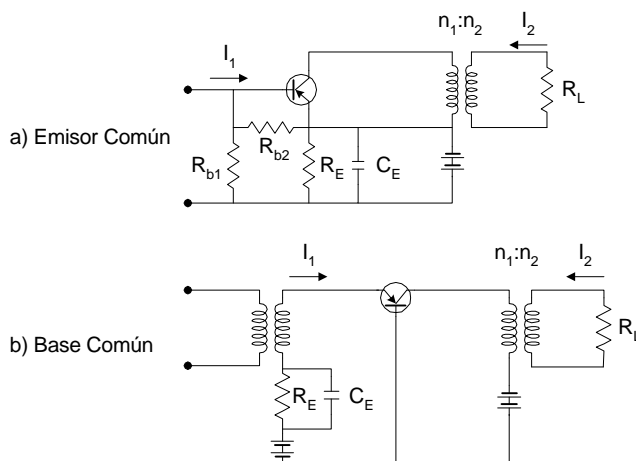
En el caso del transformador con carga, la componente "wattada"  $I_w$  puede conocerse directamente, conociendo  $W_l$

$$I_m = \frac{W_l}{E_l}$$

y la corriente del primario será:

$$I_1 = \sqrt{I_w^2 + I_m^2}$$

Comparando este valor con el calculado en primera aproximación, se determina si es necesario o no, recalculer el transformador.-



**Figura 8-7. Amplificadores acoplados por transformador.**

En principio, se aceptan diferencias no mayores de un 10%. De no superarse este valor, se consideran correctos los cálculos.-

Queda como etapa final, el análisis de sobre elevación de temperatura.-

Conviene analizar independientemente la pérdidas en el hierro y en el cobre, y sus respectivas superficies de disipación de calor. Se recuerda que

nuevamente que es conveniente que las pérdidas en el cobre y en el hierro, sean sensiblemente iguales.-

Los valores máximos de sobre elevación de temperatura dependen de los materiales utilizados. A título de guía pueden tomarse como valores máximos, 50°C para arrollamientos no impregnados y 70°C para arrollamientos impregnados.-

### 8.1.3 Transformadores de audiofrecuencia

Son dispositivos de acoplamiento y adaptación de impedancia. Su diseño, cálculo y construcción es más complicado que el de los transformadores de alimentación, pues deben cubrir una gama amplia de frecuencia y suministrar al secundario, según los casos, una potencia o una tensión, y en muchos casos funcionan con corriente continua superpuesta en el primario. En la Figura 8-7 se muestran dos circuitos típicos de amplificadores acoplados por transformador.-

Es imposible construir transformadores de audiofrecuencia perfectos, es decir, que permitan la reproducción sin distorsión de toda la banda de frecuencia de audio, y el proyecto de los mismos suele realizarse por tanteos sucesivos.-

La elección del circuito magnético es particularmente importante. Las pérdidas en el hierro deben ser mínimas para lograr una buena reproducción de las frecuencias elevadas, ya que las pérdidas crecen con la frecuencia, por lo que debe tener baja reluctancia, y para llegar a un resultado correcto en ese aspecto, sin aumentar demasiado la sección del hierro, se recurre, en algunos casos, a utilizar aleaciones de hierro-níquel de alta permeabilidad, o materiales de grano orientado.-

El circuito equivalente de estos transformadores con sus elementos asociados, generador y carga, puede plantearse como en la Figura 8-8.-

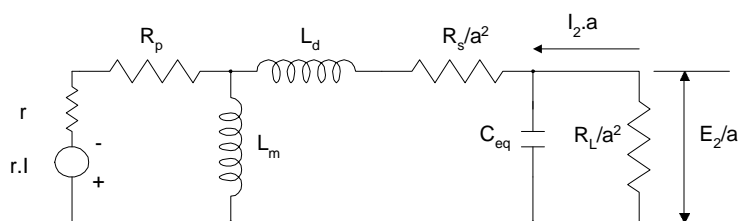


Figura 8-8. Circuito equivalente de un transformador de audio.

En este circuito el elemento activo puede ser una válvula de vacío, o un transistor, y según sea el caso, hay que hacer una de las siguientes substituciones:

	Válvula de Vacío	Transistor
R	$R_p$	$1/h_o$
I	$G_m \cdot E_1$	$H_f \cdot I_1$

En el circuito equivalente de la Figura 8-8 es:

$L_m$ : inductancia del primario a circuito abierto (inductancia incremental del primario)

$L_d$ : inductancia de dispersión total  $L_d = L_p + L_s/a^2$

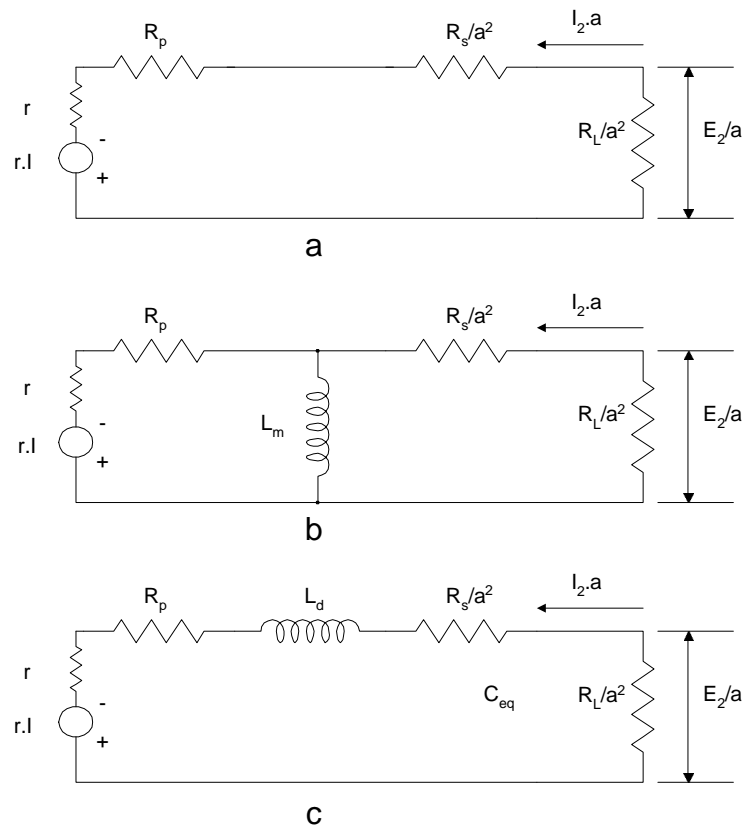
$C_{eq}$ : capacidades distribuidas del primario y secundario, supuestas concentradas

$R_p$ : resistencia del devanado primario

$R_s$ : resistencia del devanado secundario

$R_l$ : resistencia de la carga

$a$ : relación de transformación ( $N_1/N_2$ )



**Figura 8-9. Circuitos equivalentes para: a) frecuencia media, b) frecuencia baja y c) frecuencia alta.**

Es necesario dividir por  $a^2$  todas las impedancias conectadas al secundario del transformador, para pasarlas a la malla del primario, en el circuito equivalente.-

Las impedancias del generador y de la carga se suponen puramente resistivas.-

Las pérdidas en el núcleo se desprecian, pues en general, se trabaja con valores de inducción bajos.-

Los transformadores de audiofrecuencia pueden clasificarse en dos grupos:

- Transformadores de potencia.
- Transformadores de tensión.

### 8.1.3.1 Transformadores de potencia

Como su nombre lo indica, manejan potencia, potencia que tienen que transferir del primario al secundario.-

Se utilizan principalmente en la etapa final de los amplificadores, para adaptar la impedancia de la última etapa, a la impedancia de utilización que generalmente es la bobina móvil de un altoparlante. En estos casos, se llaman transformadores de salida.-

Los transformadores de salida funcionan con impedancias de carga relativamente baja, y dado el bajo valor de  $R_L$  puede despreciarse  $\chi C_{eq}$ , es decir, que la  $C_{eq}$  no cuenta.-

Los circuitos equivalentes simplificados de los transformadores de salida, adaptados para los casos de frecuencias medias, bajas y altas se indican en la Figura 8-9.-

Analizando el comportamiento de estos circuitos, pueden obtenerse los correspondientes valores de amplificación:  $A_{media}$ ,  $A_{baja}$ ,  $A_{alta}$ , y relacionando entre sí estos valores se obtienen valores relativos de amplificación (ver Gray, Angelo, Chirlian, etc.)



$$\frac{A_{\text{baja}}}{A_{\text{media}}} = \frac{1}{1 - j \frac{R'}{w \cdot L_m}}$$

$$\frac{A_{\text{alta}}}{A_{\text{media}}} = \frac{1}{1 + j \frac{w \cdot L_d}{R''}}$$

siendo:

$$R' = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R'' = R_1 + R_2$$

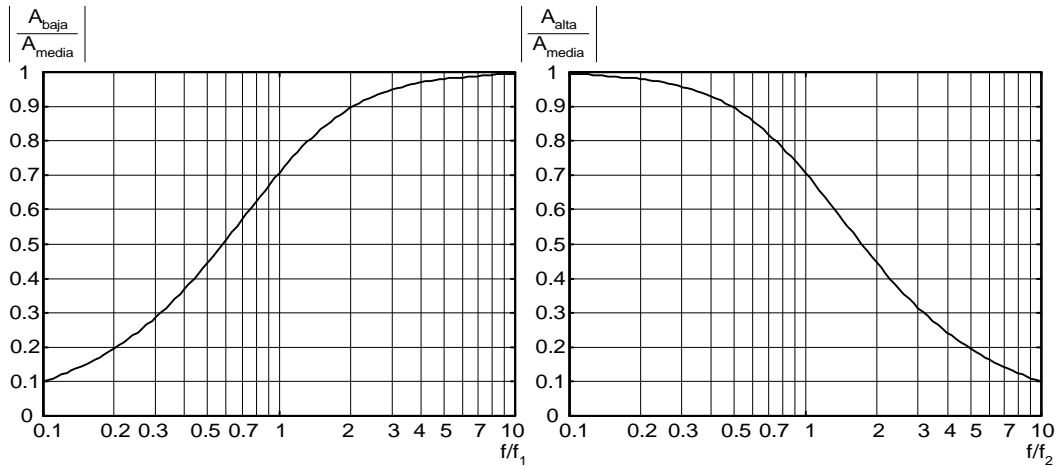
en donde:

$$R_1 = r + R_p$$

$$R_2 = \frac{R_s}{a^2} + \frac{R_L}{a^2}$$

Si en las expresiones anteriores se hace:

$$R' = 2 \cdot p \cdot f_1 \cdot L_m \quad \text{y} \quad R'' = 2 \cdot p \cdot f_2 \cdot L_d$$



**Figura 8-10. Curvas universales de características de frecuencias.**

siendo  $f_1$  y  $f_2$  las frecuencias a las cuales la reactancias de  $L_m$  y  $L_d$  se hacen igual a  $R'$  y  $R''$  respectivamente, se obtiene:

$$\frac{A_{\text{baja}}}{A_{\text{media}}} = \frac{1}{1 - j \left( \frac{f_1}{f} \right)}$$

$$\frac{A_{\text{alta}}}{A_{\text{media}}} = \frac{1}{1 + j \left( \frac{f}{f_2} \right)}$$

y en valor absoluto:

$$\left| \frac{A_{\text{baja}}}{A_{\text{media}}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_1}{f} \right)^2}}$$

$$\left| \frac{A_{\text{alta}}}{A_{\text{media}}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_2} \right)^2}}$$

Para la frecuencia  $f_1$  y  $f_2$  el valor absoluto de la ganancia de tensión es igual a 0,5, o sea 70,7% del valor absoluto de la ganancia de la tensión a las frecuencias medias, y la potencia recogida sobre una resistencia de carga fija vale la mitad de su valor correspondiente a frecuencias medias, por lo que se conocen por frecuencias superior e inferior de mitad de potencia.-

Graficando las ganancias en función de  $f/f_1$  y  $f/f_2$  respectivamente, se obtienen las curvas universales de características de frecuencias de estas etapas. Estas curvas se ven en la Figura 8-10.-

Suele ser más cómodo, expresar las respuestas relativas en decibeles. Para esto se efectúan representaciones gráficas logarítmicas de la Figura 8-11 teniendo en cuenta que:

$$\left| \frac{A_{baja}}{A_{media}} \right|_{dB} = 20 \cdot \log \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(f_1)^2}{f^2}}} = -10 \cdot \log \left[ 1 + \frac{(f_1)^2}{f^2} \right]$$

$$\left| \frac{A_{alta}}{A_{media}} \right|_{dB} = 20 \cdot \log \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(f)^2}{f_2^2}}} = -10 \cdot \log \left[ 1 + \frac{(f)^2}{f_2^2} \right]$$

Es interesante observar que a  $f_1$  y  $f_2$  corresponden caídas de 3 decibeles, por lo que se suelen llamar frecuencias a 3dB.-

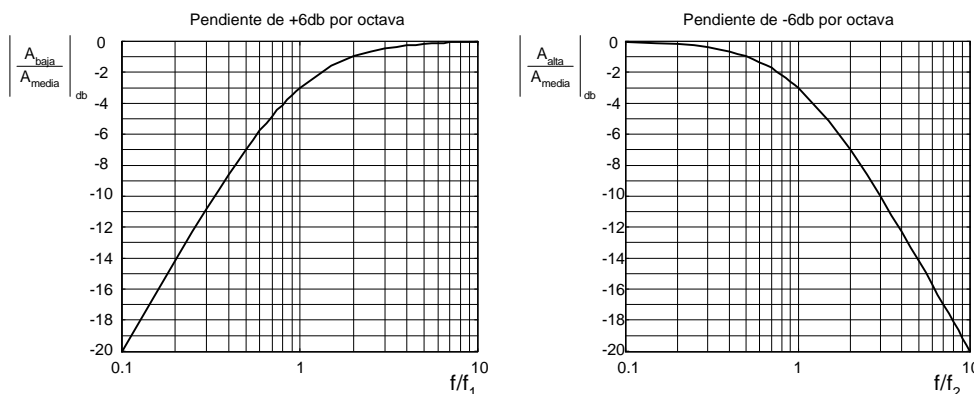


Figura 8-11. Características de frecuencia.

Del razonamiento hecho se deduce que pueden expresarse  $L_m$  en función de  $f_1$  y  $R'$ , y  $L_d$  en función de  $f_2$  y  $R''$ .-

$$L_m = \frac{R'}{2 \cdot p \cdot f_1}$$

$$L_d = \frac{R''}{2 \cdot p \cdot f_2}$$

#### 8.1.3.1.1 Proyecto de un transformador de salida

Antes de comenzar al cálculo hay que plantear las características de respuestas deseadas, las que dependerán del servicio a que estará afectada la unidad.-

En AM normalmente se pretende un ancho de banda de 30 a 10000Hz; en FM de 20 a 30000Hz; en telefonía de 150 a 4000Hz; etc.

Este ancho de banda está asociado a la máxima atenuación permisible. Puede ser de 3dB, pero en servicios móviles se aceptan caídas mayores, mientras que en alta fidelidad y broadcasting, caídas menores (2dB por ejemplo).-

Los datos a tener en cuenta serán: las frecuencias mínimas y máximas y las atenuaciones permisibles y las características de la etapa final; válvula

o transistor empleado, y sus características de funcionamiento, e impedancia de la carga ( $R_L$ ).-

De las curvas características, y una vez trazada la recta de carga, pueden obtenerse  $I_{cc}$ ,  $E_p$  y  $Z_p$ ; y como se conoce  $R_L$ , se puede hallar la relación de espiras.

$$Z_p = \frac{N_1^2}{N_2^2} \cdot R_L = n^2 \cdot R_L = \frac{R_L}{a^2}$$

Con estos valores, se pueden despejar  $R'$  y  $R''$ , estimando, en un cálculo inicial, los valores de la resistencia del primario y del secundario (los que también en un primer cálculo pueden despreciarse).-

Por otra parte, entrando en las curvas universales de ganancia en función de la frecuencia, con los valores  $F_{min.}$  y  $F_{max.}$ , pueden obtenerse  $f_1$  y  $f_2$  (si las atenuaciones permisibles son 3dB,  $f_{min.}$  coincide con  $f_1$  y  $f_{max.}$  con  $f_2$ ).-

Con los valores así obtenidos de  $R'$  y  $R''$ ,  $f_1$  y  $f_2$  pueden despejarse  $L_m$  y  $L_d$ .-

$$L_m = \frac{R'}{2 \cdot p \cdot f_1}$$

$$L_d = \frac{R''}{2 \cdot p \cdot f_2}$$

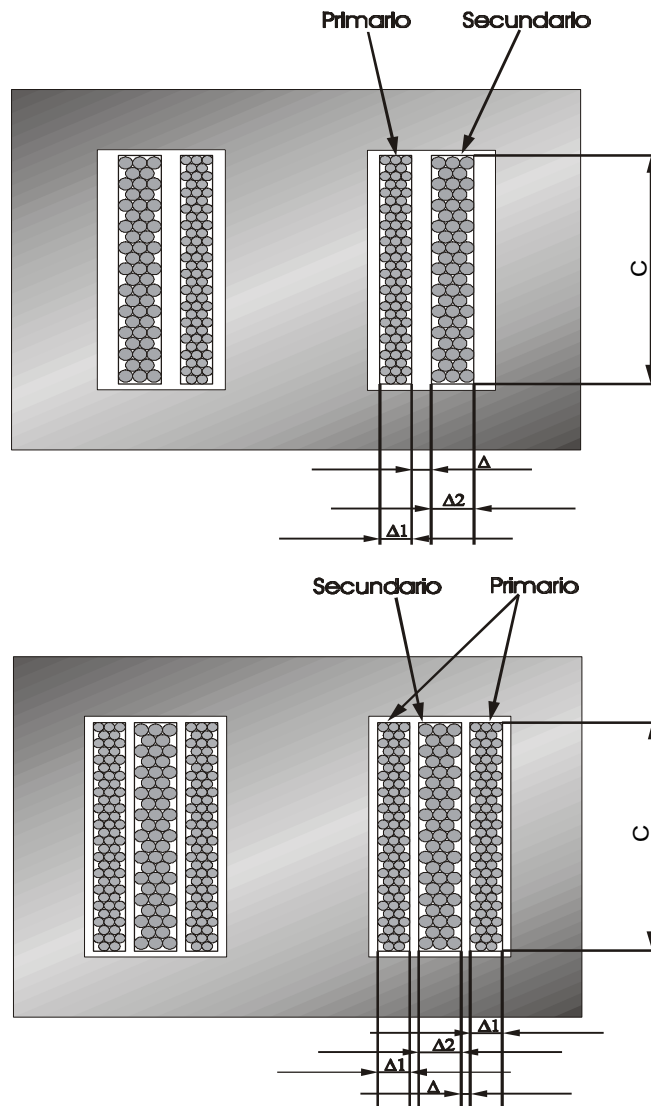


Figura 8-12. Subdivisión del devanado para disminuir  $L_d$ .

Y el transformador puede calcularse como un inductor de valor  $L_m$ , pero con una dimensión de ventana tal que permita alojar el arrollamiento secundario.-

El transformador así diseñado va a responder correctamente en frecuencias bajas, y resta analizar su comportamiento en frecuencias altas. Para esto se calcula la inductancia de dispersión real y si:

$$L_d (\text{real}) \leq L_d (\text{requerida})$$

el problema está resuelto. En caso contrario, hay que tratar de bajar el valor de inductancia de dispersión. Para esto, puede aumentarse la sección del hierro, con lo que se baja  $N_1$  y por lo tanto la inductancia de dispersión que es función de  $N_1^2$ , pero con esto aumentan las pérdidas en el núcleo, y por otro lado puede llegar a ser dificultoso dimensionarlo para un correcto valor de  $L_m$ . En este caso, se adopta el criterio de subdividir el devanado (Figura 8-12), aumentando con esto, el acoplamiento, y disminuyendo la dispersión.-

La inductancia de dispersión, teniendo en cuenta las dimensiones de la Figura 8-12, es:

$$L_d = \frac{0,4 \cdot p \cdot N_1^2}{C} \cdot \ell \cdot \left( \frac{\Delta + \Delta_1}{3} + \frac{\Delta_2}{3} \right) \cdot 10^{-8} [\text{Hy}]$$

$$L_d = \frac{0,4 \cdot p \cdot N_1^2}{C} \cdot \frac{N_1^2}{2} \cdot \ell \cdot \left( \Delta \cdot \frac{\Delta_1}{3} + \frac{\Delta_2}{3} + \frac{\Delta_3}{3} \right) \cdot 10^{-8} [\text{Hy}]$$

$\ell$ : longitud de la espira media, en cm.

En general puede decirse que para tener bajos valores de  $L_d$  deben tenerse:

1. Bobinados altos y poco espesos.
2. Pequeños espesores entre arrollamiento, esto se logra usando aislantes de buena calidad.

Otro criterio de cálculo sería, calculando en forma similar a un transformador de poder, y luego calcular las caídas a las distintas frecuencias.

### 8.1.3.2 Transformadores de tensión

Tienen como finalidad asegurar la adaptación de impedancia entre etapas o elementos, y normalmente, amplificar la tensión aplicada al primario. Pero no transmiten potencia.-

Se clasifican en transformadores de entrada y transformadores interetapas.-

Los transformadores de entrada se caracterizan por: ausencia de C.C.; bajos niveles de tensión alterna, y algunas veces, por la necesidad de blindaje magnética.-

Las características de los transformadores interetapas, dependen de las características de las etapas a acoplar.-

En los transformadores de tensión, debido a que, normalmente, la impedancia de la carga es alta, no se puede despreciar la  $I_{ceq}$  y por lo tanto, presentan una frecuencia de resonancia ubicada en el extremo superior de la banda a transmitir.-

Analizando el comportamiento de estos circuitos, se obtienen los correspondientes valores de amplificación  $A_{media}$ ,  $A_{baja}$  y  $A_{alta}$ , y relacionando entre sí estos valores, se obtienen los valores relativos de amplificación y además los valores  $w_o$ ,  $f_o$  y  $Q_o$ . (ver Gray, Agelo, Chirlian, etc).-

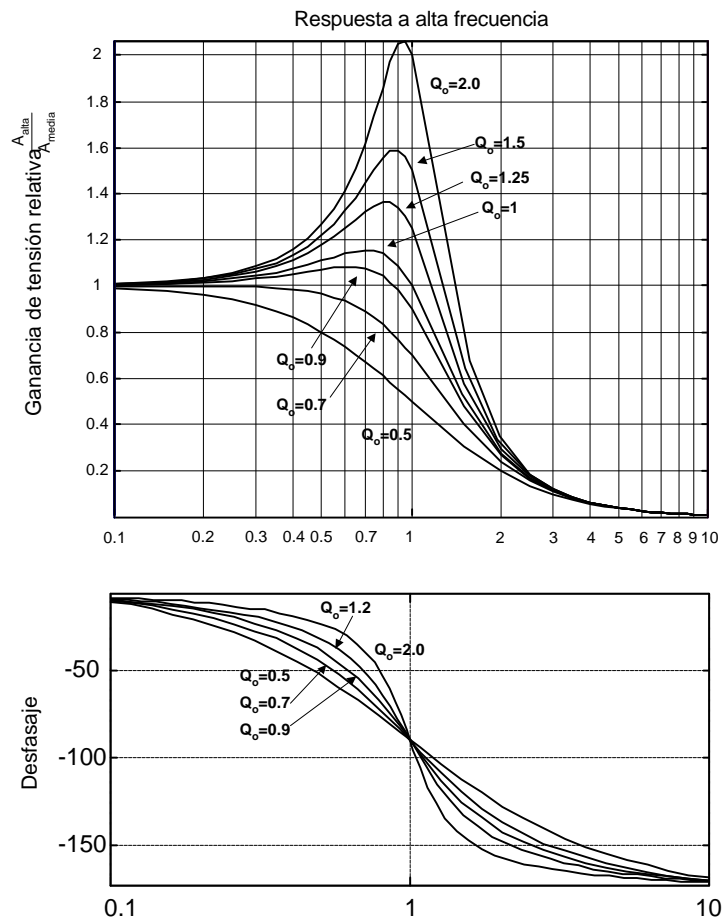
En frecuencias bajas, el comportamiento es similar al de los transformadores de salida.-

En frecuencias altas, se define la pulsación de resonancia serie:

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_d \cdot C_{eq}}} \therefore f_0 = \frac{1}{2 \cdot p \cdot \sqrt{L_d \cdot C_{eq}}}$$

y el  $Q$  del circuito a la frecuencia de resonancia:

$$Q = \frac{v_0 \cdot L_d}{R''}$$



**Figura 8-13. Curvas de ganancia de tensión y de fase para un amplificador acoplado por transformador.**

La relación entre los correspondientes valores de amplificación puede expresarse (en valor absoluto):

$$\frac{A_{alta}}{A_{media}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{v}{v_0} \cdot \frac{1}{Q_0}\right]^2}}$$

Las curvas correspondientes a esta relación se grafican en la Figura 8-13.-



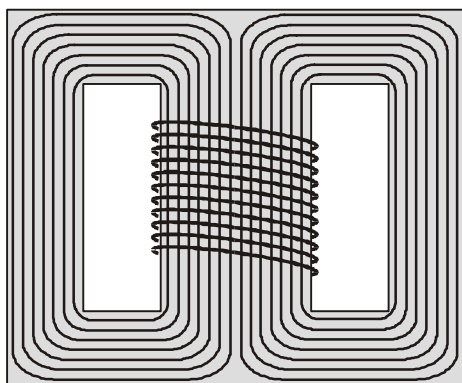
## 9 CAPÍTULO IX

### 9.1 Blindajes

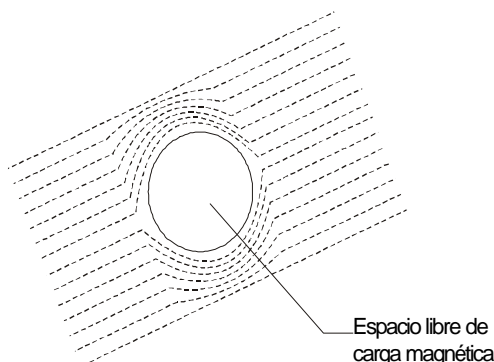
Las corrientes que circulan por los componentes crean alrededor de los mismos, campos eléctricos o magnético, y estos campos suelen provocar transferencias de energía no deseadas.-

Para evitar estas transferencias de energía se utilizan los blindajes. La función de los mismos es, confinar los campos (eléctricos o magnéticos) en espacios limitados, o impedirles la entrada a espacios particulares, y en principio, son recintos que rodean el espacio en que se quiere confinar el campo, o el espacio en el que se quiere impedir la entrada del campo.-

**Blindaje de un elemento perturbador**



**Blindaje de una zona perturbada**



**Figura 9-1. Distintos blindajes.**

A continuación se analizará el problema de los blindajes, considerando primero los campos magnéticos y luego los campos eléctricos, y buscando en cada caso las soluciones más apropiadas.-

#### 9.1.1 Blindaje de campos magnéticos

Para este análisis se clasifican los campos magnéticos en:

- Campos magnéticos generados por corrientes unidireccionales, o de baja frecuencia.
- Campos magnéticos generados por corriente de alta frecuencia.

Además hay que mencionar que en los campos magnéticos existen dos posibilidades de lograr el efecto blindaje.-

- La primera es: Desviar el curso del campo.
- La segunda es: Anular el campo, oponiéndole otro igual y de sentido contrario.

Los blindajes que se utilizan para desviar el curso del campo, están contruidos con materiales magnéticos, y se llaman **Blindajes Magnéticos**.-

Los blindajes que se utilizan para generar un campo que se oponga al perturbador, están contruidos con materiales conductores, y se llaman **Blindajes Conductores**.-

##### 9.1.1.1 Blindajes Magnéticos

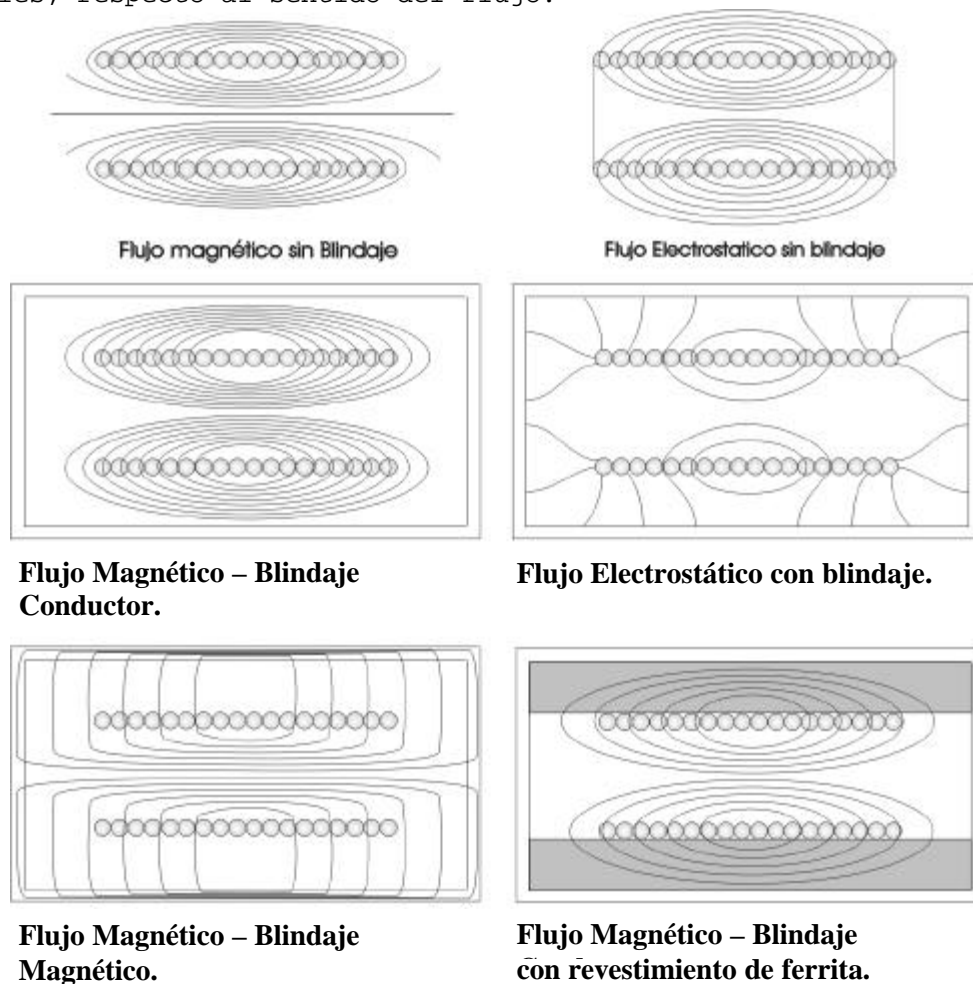
Se utilizan para blindar campos unidireccionales, o de baja frecuencia, y se basan en desviar el curso del campo.-

Se construyen con materiales de alta permeabilidad, que al proveer caminos de baja reluctancia, encausan las líneas del flujo en el interior del mismo, es decir, que actúan como cortocircuito de las líneas de flujo que tienden a atravesarlo. El material magnético debe tener además, alta permeabilidad inicial, pues el campo disperso alrededor de una bobina o un transformador puede ser pequeño ya que el núcleo concentra la mayor parte del

flujo (el núcleo de un transformador o de un inductor actúa, en cierta forma como blindaje magnético).-

Entre los materiales corrientemente utilizados para la construcción de blindajes magnéticos puede mencionarse el **mumetal** y el **permalloy**. El hierro y el acero no son convenientes por sus bajos valores de permeabilidad inicial.-

La eficacia de un blindaje magnético es proporcional al espesor del blindaje, y en lo posible no debe existir entrehierro o juntas magnéticas transversales, respecto al sentido del flujo.-



**Figura 9-2. Trayectoria de las líneas de flujo electrostático y magnético de una misma bobina con y sin blindaje.**

La eficacia de un blindaje magnético (de una sola capa) es aproximadamente igual a:

$$\frac{\text{Campo magnético en ausencia de blindaje}}{\text{Campo magnético con blindaje}} = 0,22 \cdot \mu \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{R_0} \right)^3 \right]$$

en donde:

$\mu$ : permeabilidad inicial del blindaje.

$R_0$ : radio de la esfera que encierra el mismo volumen que la superficie exterior del blindaje.

$t$ : espesor del blindaje.

Esta ecuación muestra que el factor del blindaje máximo que es posible obtener es de  $0,22\mu$  y que aproximadamente el 50% se obtiene cuando el espesor del blindaje es 1/5 del radio de la esfera equivalente.-

Cuando el grado de blindaje deseado es mayor que el que se puede obtener con una sola capa, se emplean 2 o 3 camisas concéntricas de material magnético, separadas por un espacio de aire. En este caso la eficacia es



aproximadamente proporcional a  $\mu^n$ , siendo  $\mu$  la permeabilidad inicial, y  $n$  el número de capas concéntricas.-

La eficacia a las corrientes alternas puede aumentar más aún, colocando cobre en los espacios entre las camisas magnéticas.-

Un uso importante que suele hacerse de los blindajes magnéticos, es reducir, en determinados espacios, las interferencias producidas por transformadores conectados a la red de distribución eléctrica (ejemplo: blindaje de los tubos de rayos catódicos).-

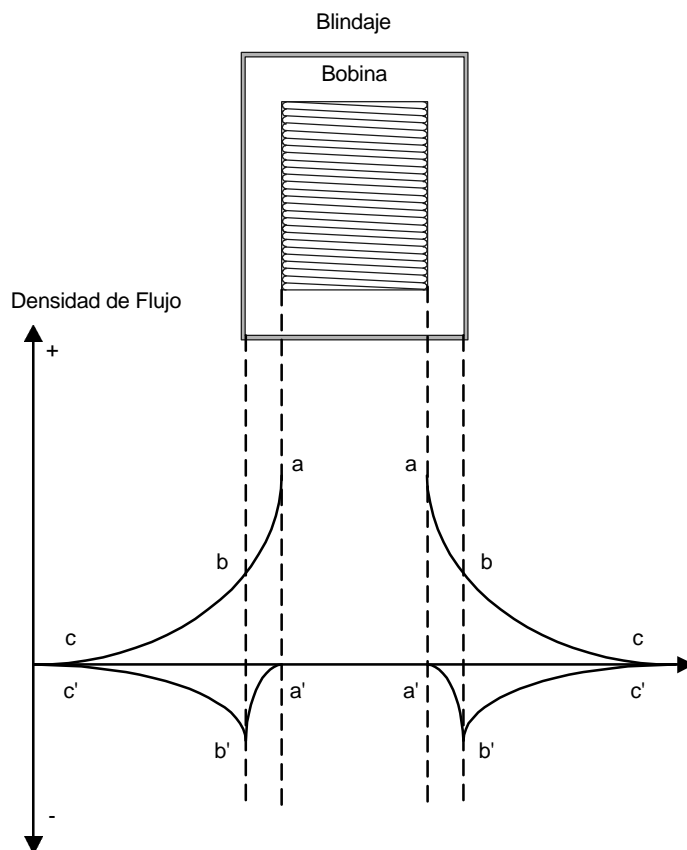
Los blindajes magnéticos suelen también ser muy efectivos en el campo de las radio frecuencias, pero los blindajes conductores (que se verán a continuación) son más baratos, por lo que son preferibles, siempre que la frecuencia sea suficientemente alta como para obtener un blindaje correcto, con un espesor razonable del blindaje conductor.-

La introducción de un blindaje magnético, en general, aumenta la inductancia del componente que se blindaje, debido a la reducción de la reluctancia del circuito magnético; de usarse en RF las pérdidas aumentan, y el  $Q$  disminuye.-

#### **9.1.1.2 Blindajes conductores**

Se utilizan para blindar campos magnéticos de radiofrecuencia y se basan en anular el campo, oponiéndole otro igual y de signo contrario.-

Para entender su principio de funcionamiento es interesante recordar, que cuando una lámina metálica de conductividad infinita, corta líneas de fuerza de un campo magnético, generándose en la lámina, corrientes circulares, las que a su vez generan un campo inducido que se opone al que lo generó, y este no atraviesa la lámina.-



**Figura 9-3. Distribución de la densidad de flujo.**

Desde el punto de vista de los blindajes y para frecuencias usuales, el comportamiento del cobre o del aluminio es prácticamente el de un conductor perfecto.-

El flujo magnético penetra en los blindajes conductores con gran dificultad pues en el material conductor se inducen corrientes parásitas que se oponen a la penetración.-

En este caso de las bobinas de RF el blindaje envuelve a la bobina, y equivale a una espira metálica única en cortocircuito.-

El flujo magnético producido por la corriente que circula por la bobina, induce en el blindaje una **f.e.m.** que hace circular una corriente que a su vez produce un campo magnético de igual intensidad pero dirección opuesta a la de la bobina, anulando el campo en el espacio exterior a la bobina.-

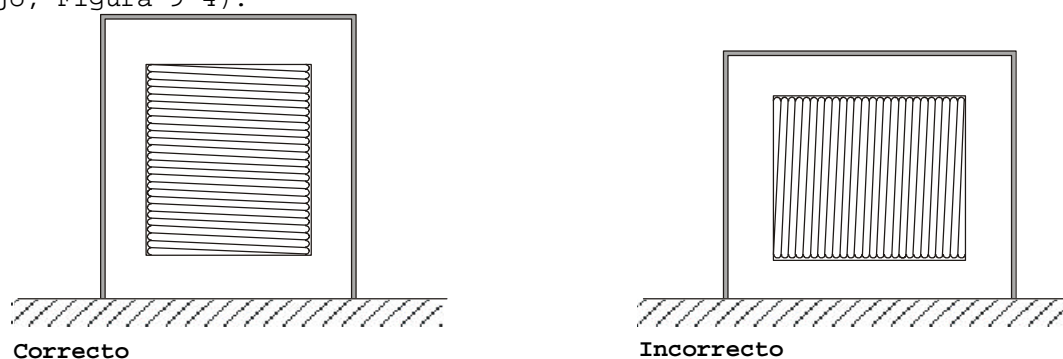
En el gráfico de la Figura 9-3, se esquematiza la densidad de flujo en el espacio que rodea a una bobina; a b c representa la distribución de la densidad de campo alrededor de la bobina; a' b' c' representa la intensidad de campo debido a las corrientes que se inducen en el blindaje.-

Sumando los gráficos, se ve que el campo en el exterior del blindaje es prácticamente cero, y en el interior del blindaje, menor con blindaje que sin blindaje.-

Para que los blindajes conductores sean efectivos, deben encerrar completamente el espacio a proteger, hay que tener en cuenta que las juntas o uniones, que eventualmente pueden haber, no dificultan la circulación de las corrientes, inducidas en el mismo.-

Este problema se presenta cuando se montan bobinas blindadas en un chasis, o cuando se coloca tapa a una caja de blindaje. Se debe evitar que la corriente circule por las juntas o uniones, pues aunque se tomen precauciones, para asegurar un buen contacto a lo largo de la junta o unión, con el tiempo, y sobre todo por la posible oxidación de los metales en contacto, la resistencia de la unión aumenta.-

En cuanto a la presencia de perforaciones o ranuras, las mismas pueden existir a condición de que las primeras sean de pequeño diámetro, y las segundas, en el sentido de las corrientes inducidas y no transversales a ella (es decir, que sean ortogonales a la dirección del flujo, y no en el sentido del flujo, Figura 9-4).-



**Figura 9-4. Fijación de bobinas blindadas a un chasis.**

Debido al hecho de que la conductividad de los materiales del blindaje no es infinita, las corrientes no fluyen solamente por la superficie interna del blindaje, sino que penetran en el metal, y la penetración sigue una ley exponencial.-

Para que un blindaje sea eficiente, no debe circular corriente en la parte exterior del mismo, por lo tanto debe tener un espesor adecuado.-

La profundidad (en mm) a la cual la corriente se reduce a un 10% de su valor superficial, viene dada, por:

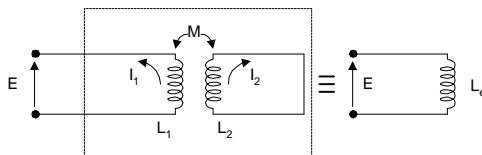
ecuación

El espesor de los blindajes debe ser de 3 a 4 veces esta profundidad de penetración.-

La profundidad de penetración de la corriente, es proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad del material, por lo que los blindajes de aluminio deberán tener un espesor de 1,37 veces espesor de los de cobre, para tener la misma eficiencia.-

En el caso de las RF los espesores de 0,5mm normalmente empleados son suficientes, mientras que para las BF los espesores que se obtendrían serían

prohibitivos, por lo que no se emplean blindajes conductores en bajas frecuencias.-



**Figura 9-5. Inductancia equivalente de un circuito con blindaje.**

Es particularmente interesante analizar el comportamiento de un bobina con blindaje conductor, pudiendo observarse los siguientes efectos.-

- Disminución de la inductancia.
- Variación del  $Q$  (normalmente en aumento).
- Aumento de la capacidad distribuida.

La disminución de la inductancia es fácilmente entendible pues el blindaje disminuye el área transversal a través de la cual puede pasar el flujo. También esta disminución puede explicarse aplicando la teoría de los circuitos acoplados y considerando al blindaje como un secundario en cortocircuito.-

Si se busca la expresión de la inductancia equivalente que se ve desde los bornes de entrada (Figura 9-5), se encuentra que es menor que la inductancia sin blindaje.-

En efecto, la tensión en la maya de entrada será:

$$\text{Ec. 9-1} \quad E = I_1 \cdot J \cdot w \cdot L_1 - I_2 \cdot J \cdot w \cdot M$$

y en la maya de salida:

$$0 = I_1 \cdot J \cdot w \cdot L_1 - I_2 \cdot J \cdot w \cdot L_2$$

de donde se puede despejar  $I_2$

$$-I_1 \cdot J \cdot w \cdot L_1 = I_2 \cdot J \cdot w \cdot L_2 \quad \therefore \quad I_2 = I_1 \cdot \frac{M}{L_2}$$

que reemplazado en la Ec. 9-1 nos da:

$$E = I_1 \cdot J \cdot w \cdot L_1 - I_1 \cdot J \cdot w \cdot \frac{M^2}{L_2}$$

$$L_e = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$$

La disminución de inductancia como resultado de la introducción de un blindaje cilíndrico, que es largo comparado con la longitud de la bobina, y el diámetro de la misma está dado en forma aproximada por la siguiente curva.-

(182)

El efecto sobre el  $Q$  depende naturalmente del  $Q$  inicial de la bobina, y de la naturaleza de las pérdidas que determinan el  $Q$  en ausencia de blindaje; generalmente el  $Q$  disminuye (con la introducción de un blindaje) a consecuencia del aumento de las pérdidas debida a la energía que se disipa en el blindaje (corrientes parásitas).-

Existen casos en que el  $Q$  aumenta al blindar una bobina, por existir próximo a la misma, circuitos absorbentes o zonas metálicas de materiales de elevada resistividad.-

El efecto sobre el  $Q$  puede calcularse teniendo en cuenta que blindaje introduce una resistencia adicional en serie con la bobina, del siguiente valor:

$$R_B = \frac{0,87 \cdot 10^{-4} \cdot N^2 \cdot r_b^2 \cdot \sqrt{f \cdot \rho}}{t^3}$$

donde:

**N**: número de espiras de la bobina.

**r<sub>b</sub>**: radio de la bobina.

**t<sup>3</sup>**: (diámetro del blindaje)<sup>2</sup> · (longitud del blindaje) / **S**

**f**: frecuencia en ciclos.

**ρ**: resistividad del blindaje en [Ω/cm<sup>3</sup>] (Cu: 1,724 · 10<sup>-6</sup>).

Esta ecuación supone que el espesor del blindaje es grande comparado con la profundidad de penetración; si no fuera así deberá tomarse:

$$R_B = \frac{4,7 \cdot N^2 \cdot \rho}{f} \cdot \left( \frac{r_b}{t} \right)^4$$

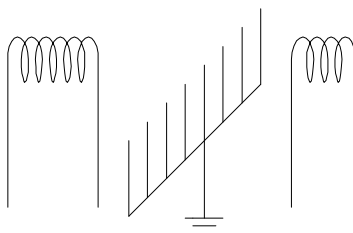
En cuanto al efecto sobre la capacidad distribuida no se suele tenerlo en cuenta pues el aumento de la capacidad provocado por el blindaje es pequeño y difícil de poder expresarlo con cierta precisión.-

Todos los efectos debidos a la introducción del blindaje son tolerables cuando la distancia entre la bobina y el blindaje es, en todas partes, por lo menos igual al radio de la bobina.-

### 9.1.2 Blindaje de campos eléctricos

La existencia de puntos a distinto potencial crean campos eléctricos, y estos campos inducen, en los elementos del circuito próximos a los mismos, tensiones que pueden provocar perturbaciones e inestabilidades no deseadas. Un blindaje conveniente puede limitar estos campos, encerrándolos en determinadas zonas donde su influencia no sea perjudicial; para estos se utilizan pantallas de material conductor conectadas a masa que ofician como blindaje y se suelen llamar blindajes electrostáticos.-

Cualquier conductor puede utilizarse como blindaje electrostático. No existen requerimientos particulares con respecto al espesor o la conductividad de los mismos, simplemente que las líneas de campo eléctrico concluyan en el blindaje en vez de extenderse por el espacio que se quiere proteger.-



**Figura 9-6. Blindaje electrostático sin circuitos cerrados.**

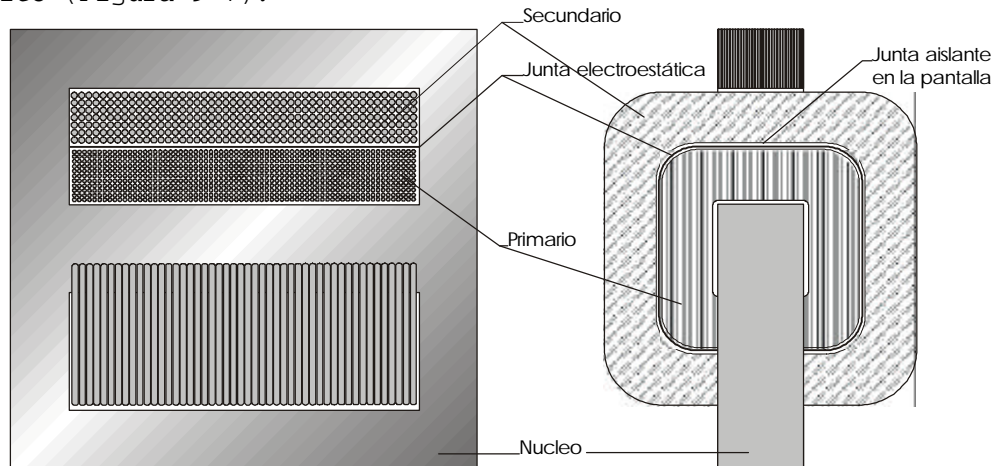
Estos blindajes pueden ser: o de una superficie que encierre un determinado volumen, o simplemente una pantalla que separa dos elementos, en ambos casos el material con el que están hechos puede ser, una lámina metálica, o una red metálica, es decir que la superficie del blindaje puede tener pequeñas perforaciones o cortes longitudinales, también pequeños, sin que se noten diferencias sensibles en los resultados.-

Los blindajes magnéticos y conductores vistos anteriormente proveen, en consecuencia, un blindaje a los campos eléctricos.-

Los blindajes electrostáticos aquí planteados pueden llegar a afectar el campo magnético, para que no lo hagan, se puede disponer la pantalla conductor no magnética en forma tal como para hacer terminar las líneas de flujo del campo eléctrico sin ofrecer un circuito cerrado de baja resistencia por el que puedan circular corrientes parásitas (Figura 9-6).-

Los blindajes o pantallas electrostáticas se usan, frecuentemente, en los transformadores para evitar acoplamientos electrostáticos entre los diversos

arrollamientos. Estos blindajes están constituidos por una hoja metálica que envuelve a los arrollamientos encerrándolos, pero tiene una junta de superposición aislada para evitar que la hoja actúe como una espira en cortocircuito (Figura 9-7).-



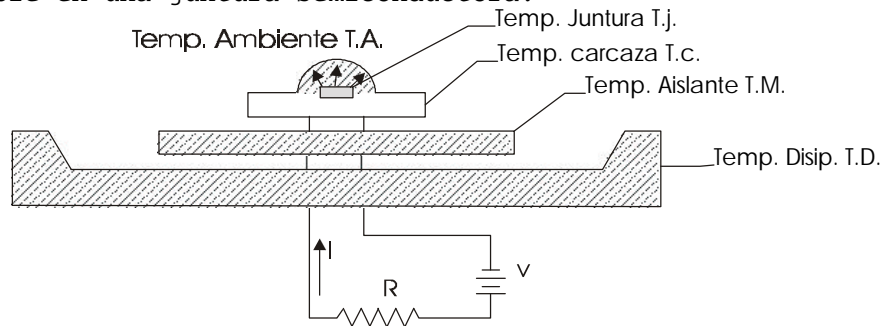
**Figura 9-7. Blindaje electrostático de un transformador.**

Un blindaje electrostático puede o no estar conectado a tierra, pero esta conexión puede llegar a ser necesaria cuando el equipo en el cual está el blindaje se conecta a la red de alimentación., o cuando el cuerpo del operador puede hacer variar la capacidad del circuito respecto de tierra.

## 9.2 Disipadores de calor

### 9.2.1 Efecto de la temperatura en los semiconductores

En este capítulo se considerará el valor práctico de la máxima disipación de calor posible en una juntura semiconductor.-

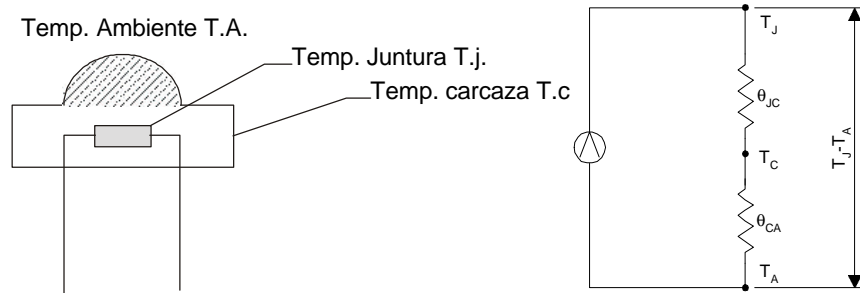


**Figura 9-8. Diodo con disipador de calor.**

La disipación de potencia eléctrica en forma de calor (efecto Joule) hace que la temperatura de la juntura aumente. Este aumento de la temperatura debe ser mantenido dentro de los límites aceptables, o de lo contrario la juntura se estropeará. El problema térmico se resuelve fácilmente por una ley térmica simple análoga a la de Ohm en la cual la corriente es sustituida por la potencia, la tensión por la temperatura y la resistencia eléctrica por la resistencia térmica  $\theta$ .-

La Figura 9-8 muestra un diodo semiconductor montado sobre un disipador de calor. El diodo está aislado eléctricamente (no térmicamente) del gran disipador de calor. El funcionamiento del sistema es el siguiente: sin conectar el diodo, la temperatura de la juntura  $T_j$  será la misma que la del ambiente  $T_a$ . Cuando se aplica una señal, se disipa potencia en el diodo. Haciendo que la temperatura de la juntura aumente. El calor producido es evacuado hacia la carcasa del diodo y por conducción pasa de la carcasa del diodo al disipador de calor. El disipador de calor tiene una gran superficie que evacua, por radiación y convección, el calor al ambiente que lo rodea.-

Si la potencia disipada en la juntura es constante y está dentro de la capacidad de disipación de energía del diodo, después de un tiempo suficiente, el sistema alcanzará el estado de equilibrio térmico. Cada uno de los elementos adquirirá, en general, una temperatura distinta. Una aproximación consiste en suponer que el aumento de temperatura es proporcional a la potencia disipada en la juntura. La constante de proporcionalidad se llama resistencia térmica y se designa por el símbolo  $\theta$ .



**Figura 9-9. Temperaturas de un diodo sin disipador y circuito eléctrico equivalente.**

Un aumento de la temperatura de la juntura por encima de la carcasa queda relacionada con la potencia disipada por la ecuación:

$$\text{Ec. 9-2} \quad T_j - T_c = \theta_{jc} \cdot P_j$$

donde:

$T_j - T_c$ : aumento de temperatura de la juntura con respecto a la carcasa, [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$P_j$ : potencia eléctrica disipada en la juntura, [W].

$\theta_{jc}$ : resistencia térmica entre la juntura y la carcasa, [ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ].

La resistencia térmica es función de la construcción del semiconductor y la carcasa y generalmente dada por el fabricante.-

Consideremos un diodo en una cápsula sin ningún montaje, como se ve en la Figura 9-9. Las temperaturas del ambiente y de la carcasa difieren en una cantidad igual al producto del  $P_j$  por la resistencia térmica entre la carcasa y el ambiente,  $\theta_{ca}$ .

La diferencia entre las temperaturas de la cápsula y el ambiente viene dada por:

$$\text{Ec. 9-3} \quad T_c - T_a = \theta_{ca} \cdot P_j$$

El circuito de la Figura 9-9 representa un sistema eléctrico análogo al sistema térmico de la misma figura, con las siguientes variables análogas derivadas de la Ec. 9-2:

Caída de la temperatura $T_j - T_a$	$\rightarrow$	Caída de tensión
Potencia de disipación $P_j$	$\rightarrow$	Grado de corriente constante
Resistencia térmica $\theta_{jc} + \theta_{ca}$	$\rightarrow$	Resistencia eléctrica

Del circuito de la Figura 9-9 y las Ec. 9-2 y Ec. 9-3 se tiene:

$$\text{Ec. 9-4} \quad T_j = P_j \cdot \theta_{jc} + P_j \cdot \theta_{ca} + T_a$$

Este resultado puede extenderse inmediatamente a todo el sistema de conducción de calor de la Figura 9-8, lo cual da:

$$\text{Ec. 9-5} \quad T_j = P_j \cdot (\theta_{jc} + \theta_{cd} + \theta_{da}) + T_a$$

aquí las resistencias térmicas no definidas son:

$\theta_{cd}$ : Resistencia térmica carcasa a disipador (incluido aislante)

$\theta_{da}$ : Resistencia térmica disipador de calor a ambiente.

En la práctica, la utilización de esta ecuación se basa en las siguientes condiciones:

- La temperatura máxima admisible en la unión es dada por el fabricante. Los valores típicos son de aproximadamente 90°C a 180°C para las juntas de germanio y de 150°C a 200°C para las de silicio.
- La temperatura ambiente en una variable no controlada que depende de las condiciones ambientales en las que equipo deberá trabajar.
- La potencia disipada en la junta depende del sistema eléctrico y viene dada, para corrientes y tensiones variables con el tiempo, por la fórmula:

$$P_j = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v_j(t) \cdot i_j(t) \cdot dt$$

Para corriente continua la expresión se reduce a:  $P_j = V_j \cdot I_j$ .

- Una vez escogido el semiconductor para cumplir con las especificaciones eléctricas, su resistencia térmica  $\theta_{jc}$  queda fijada. Esta cifra viene generalmente dada por el fabricante.-

Teniendo en cuenta estos hechos y la Ec. 9-4, se ve que, la resistencia térmica de la carcasa a ambiente es la única variable intercambiable para mantener la temperatura de la junta en un valor seguro.-

La solución de la Ec. 9-4 da:

$$q_{ca} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_j} - q_{jc}$$

Esta expresión se utiliza para determinar el valor máximo de  $\theta_{ca}$  dados todos los factores de la derecha. La Ec. 9-5 puede naturalmente utilizarse para determinar cualquiera de las otras variables.-

#### 9.2.1.1.1 Problema

Un diodo zener de silicio de 50W debe disipar 10W en un circuito determinado. La temperatura máxima admitida en la junta es de 175°C, la temperatura ambiente es de 50°C y  $\theta_{jc}=2,4^\circ\text{C/W}$ .-

Hallar la resistencia térmica máxima que puede permitírsele entre carcasa y ambiente de modo que la temperatura de la junta no exceda de 175°C.-

#### 9.2.1.1.2 Desarrollo

Un disipador típico con aislante de mica para este tipo de diodo tiene una  $\theta_{ca}=3,2^\circ\text{C/W}$  que sería adecuada para esta aplicación. Si se usa este disipador, la temperatura real de la junta puede calcularse por medio de la ecuación:

$$q_{da} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_j + q_{jc}} = \frac{175 - 50}{10 - 24} = 10,1 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \right]$$

donde  $T_j=106^\circ\text{C}$ .-

En la práctica, la estructura física del montaje del semiconductor es más compleja que la analogía eléctricas simplificadas de los párrafos anteriores. Así se tendrán por ejemplo, parámetros distribuidos no lineales más bien que concentrados.-

Así también dada una de las resistencias térmicas del circuito de la Figura 9-9, tiene en paralelo una capacidad térmica.-

Esta capacidad tiene en cuenta que si varía  $P_j$ , las distintas temperaturas del circuito no cambian instantáneamente, sino que emplean un tiempo finito para alcanzar el equilibrio. Este resulta útil a menudo, puesto que permite a la potencia instantánea ser mayor que la potencia máxima fijada en las especificaciones. En tales casos, el ciclo de trabajo debe ser mucho

más corto que las constantes de tipo térmicas, de tal modo que este calentamiento excesivo no ocurra durante una parte del ciclo.-

En otros casos, para un diseño conservador, se supone que todas las capacidades térmicas son nulas, por lo tanto, en condiciones estacionarias, la máxima capacidad de disipación de un semiconductor con un disipador asociado, será independiente del tiempo y básicamente dependerá de las resistencias térmicas, máxima temperatura de juntura y temperatura ambiente de funcionamiento.-

### **9.2.1.2 Curvas de reducción de los valores nominales**

La potencia nominal de un dispositivo semiconductor generalmente se especifica para una temperatura ambiente de 25°C.

La potencia máxima que puede disipar el semiconductor está determinada por la temperatura de la juntura. Por lo tanto la potencia nominal debe disminuirse si la temperatura ambiente aumenta para mantener la temperatura de la juntura dentro de los límites permisibles. Los fabricantes proporcionan generalmente curvas de reducción de los valores nominales que pueden usarse para determinar la disipación de potencia máxima admisible para una temperatura de la carcasa dada.

En la Figura 9-10 se muestra una curva típica de reducción de los valores nominales. Para temperaturas de la carcasa menores que  $T_{co}$ , el semiconductor puede disipar su máxima potencia admitida. Para temperaturas de la carcasa superiores a  $T_{co}$ , la máxima disipación disminuye hasta que se alcanza el valor  $T_c = T_{jmax}$ . -

Para esta temperatura máxima el semiconductor no puede disipar ninguna potencia sin que la temperatura de la juntura exceda el máximo admitido. Se demuestra que el coeficiente de disminución de la potencia al aumentar la temperatura de la carcasa es igual a  $\theta_{jc}$ . -

En la región  $T_{co}$ :

$$\text{Ec. 9-6} \quad \frac{T_{jmax} - T_{co}}{P_{jmax}} = \frac{T_j - T_c}{P_j}$$

Como por definición:

$$\text{Ec. 9-7} \quad \theta_{jc} = \frac{T_j - T_c}{P_j}$$

Sustituyendo Ec. 9-6 en Ec. 9-7 se obtiene:

$$\theta_{jc} = \frac{T_{jmax} - T_{co}}{P_{jmax}}$$

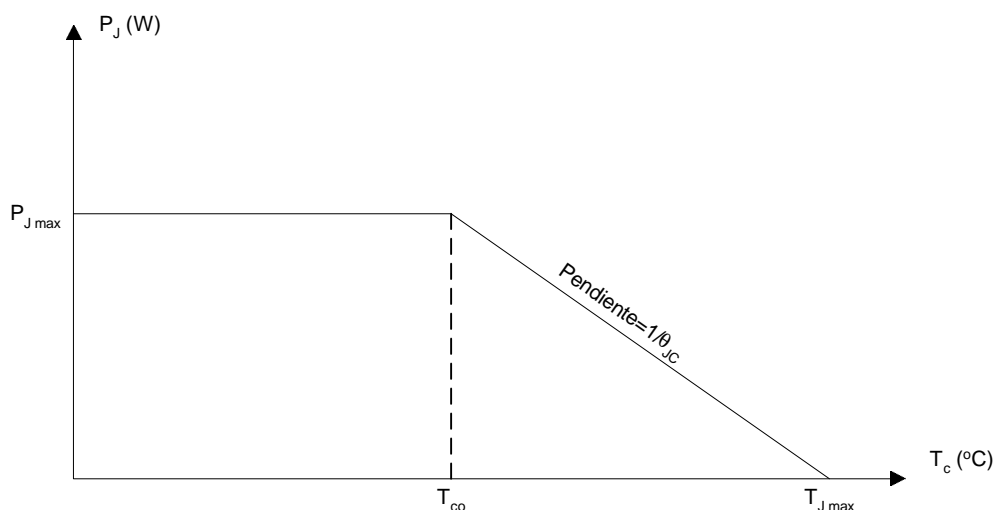
#### **9.2.1.2.1 Problema**

Un diodo zener de silicio debe disipar 15W en un circuito determinado. La temperatura máxima permisible de la juntura es 200°C, la temperatura ambiente es de 25°C y  $\theta_{jc} = 2,4^\circ\text{C/W}$ . -

Si se dispone de un disipador infinito de calor, hallar la potencia máxima permisible para el diodo (72,9 W). -

Cual es la temperatura de la juntura del diodo (61°C). -





**Figura 9-10. Variación de la máxima potencia disipable según la temperatura de carcasa.**

#### 9.2.1.2.2 Problema

Repetir el problema 9.2.1.2.1 si el disipador tiene una resistencia térmica  $\theta_{ca}=3^{\circ}\text{C/W}$ .-  
(32,4W); (106 $^{\circ}\text{C}$ ).-

#### 9.2.1.2.3 Problema

Un diodo puede disipar 20W a temperaturas menores de 50 $^{\circ}\text{C}$ . La temperatura máxima de la juntura es de 200 $^{\circ}\text{C}$ . Hallar  $\theta_{jc}$ .-  
(7,5 $^{\circ}\text{C/W}$ ).-

#### 9.2.1.2.4 Problema

Cuál es la disipación máxima permisible de potencia de un transistor 2N34A montado en el aire a una temperatura de 25 $^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta_{ja}=0,5^{\circ}\text{C/W}$ ;  $T_{j\max}=100^{\circ}\text{C}$ .-  
(750mW).-

#### 9.2.1.3 Semiconductores de potencia

Como la mayoría de los transistores de potencia el conductor de colector está conectado eléctricamente con la carcasa, es a menudo necesario aislar la carcasa del chasis en que se monta el transistor. Esto se consigue usualmente introduciendo un disco aislador que evita el paso de la corriente, pero dificulta sólo ligeramente el paso del calor. Los discos aisladores se hacen usualmente de teflón, que tiene una resistencia térmica de 1,5 $^{\circ}\text{C/W}$ , de aluminio anodizado<sup>39</sup> (1,2 $^{\circ}\text{C/W}$ ) o de mica (1,4 $^{\circ}\text{C/W}$ ). La aplicación de una grasa conductiva térmicamente, ambas caras del disco aislador, reducirá la resistencia térmica a casi un 40%.-

Cuando es necesario proporcionar un disipador de calor a los transistores de alta potencia, una regla práctica aproximada es suponer que 1cm<sup>2</sup> de superficie metálica disipará 1,25mW si su temperatura es de 1 $^{\circ}\text{C}$  mayor que la temperatura del aire ambiente. Si aplicamos la relación:

$$T_d = T_a + Q \cdot P$$

en donde:

$T_d$ : temperatura de la superficie metálica.

$T_a$ : temperatura del aire ambiente.

$Q$ : resistencia térmica de 1cm<sup>2</sup> de superficie metálica.

$P$ : disipación de potencia (en este caso 1,25mW)

<sup>39</sup> Oxidación superficial de una pieza metálica que actúa como ánodo en una electrólisis.

Si despejamos  $Q$ , obtenemos:

$$Q = \frac{T_d - T_a}{P} = \frac{1^\circ\text{C}}{1,25\text{mW}} = 800 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \right]$$

En otras palabras,  $1\text{cm}^2$  de superficie representa una resistencia térmica de  $800^\circ\text{C}.$ -

#### 9.2.1.3.1 Problema

Un transistor de potencia que tiene una  $\theta_{jc}=0,8^\circ\text{C/W}$  debe disipar  $10\text{W}$  con una  $T_a=30^\circ\text{C}$ . Con objeto de hacer un diseño conservativo se ha limitado  $T_{ja}$  a  $70^\circ\text{C}.$ -

El montaje llevará un disco aislador de teflón y grasa siliconada.-

¿Cuál es el tamaño mínimo del disipador de calor, en caso de ser este necesario?.-

#### 9.2.1.3.2 Problema

Determinar las dimensiones mínimas del disipador de calor que requiere un transistor de potencia bien ventilado que disipa  $10\text{W}$  si  $\theta_{jc}=1^\circ\text{C/W}$ ,  $\theta_{jc}=1,5^\circ\text{C/W}$ ,  $T_a=35^\circ\text{C}$  y  $T_{j\text{máx.}}=85^\circ\text{C}.$ -

#### 9.2.1.3.3 Problema

Sea el circuito de la fuente de alimentación de la fig. con un transistor serie de paso del tipo BD130 y se pide determinar:

- 1 El número mínimo de transistores necesarios para no sobrepasar la  $P_{j\text{máx.}}$ .
- 2 Dimensión (Sup.) que deberá tener cada uno de los disipadores del ítem anterior montando los transistores con mica y grasa siliconada.
- 3 El nº de transistores del tipo que será necesario implementar para poder hacer uso del disipador MOTOROLA MS-15.
- 4 La potencia disipada por cada uno de los transistores del ítem anterior.
- 5 La temperatura que podrían disipar los transistores a esta temperatura de carcasa y contando con un disipador adecuado.
- 6 Dimensión (Sup.) que debería tener el disipador del ítem anterior.
- 7 Temperatura de operación de la juntura del ítem b cuando la temperatura ambiente es de  $25^\circ\text{C}.$

## 10 CAPÍTULO X

### 10.1 Proyecto de inductores o trafos con c.c. y c.a. Superpuestas

#### 10.1.1 Determinación, mediante computadora, de los gráficos necesarios para realizarlos

##### 10.1.1.1 Introducción

Se recuerda la expresión que permite calcular la inducción de una bobina con núcleo de hierro con circulación de corriente continua y corriente alterna superpuestas.

$$\text{Ec. 10-1} \quad L = \frac{0,4 \cdot p \cdot 10^{-8} \cdot N^2 \cdot S}{\ell_h} \cdot \mu_a$$

siendo:

$$\mu_a = \frac{1}{\frac{1}{\Delta\mu} + \frac{\ell_a}{\ell_h}}$$

donde:

**N**: número de espiras  
**S**: sección del material magnético (cm<sup>2</sup>)  
**ℓ<sub>h</sub>**: longitud del camino magnético (cm)  
**Δμ**: permeabilidad incremental  
**ℓ<sub>a</sub>**: longitud del entrehierro (cm)

Multiplicando miembro a miembro por **I<sub>cc</sub><sup>2</sup>/V<sub>h</sub>** se tiene:

$$\text{Ec. 10-2} \quad \frac{L \cdot I_{cc}^2}{V_h} = 0,4 \cdot p \cdot 10^{-8} \cdot \mu_a \cdot \left( \frac{N \cdot I_{cc}}{\ell_h} \right)^2$$

donde:

**I<sub>cc</sub>**: intensidad de corriente continua (A)  
**V<sub>h</sub>**: volumen del material magnético (cm<sup>3</sup>)

Las curvas representarán

$$\frac{L \cdot I_{cc}^2}{V_h} = f \left( \frac{N \cdot I_{cc}}{\ell_h} \right)$$

tendrán como parámetros

$$M = \frac{\hat{E}_{ca} \cdot I_{cc} \cdot 10^8}{V \cdot V_h} \quad \text{y} \quad \frac{\ell_a}{\ell_h}$$

donde:

**Ê<sub>ca</sub>**: Tensión alterna de cresta (Volt)  
**ω**: pulsación de Ê<sub>ca</sub>

##### 10.1.1.2 Método para determinar las curvas

Los datos necesarios del material magnético son los siguientes:

A La curva de magnetización **B-H**. (Figura 10-1).

B Las curvas que dan la permeabilidad incremental ( $\Delta\mu$ ) en función de la intensidad de campo continuo ( $H_{hcc}$ ), con parámetro de inducción alterna  $\Delta B_1$  (Figura 10-2).

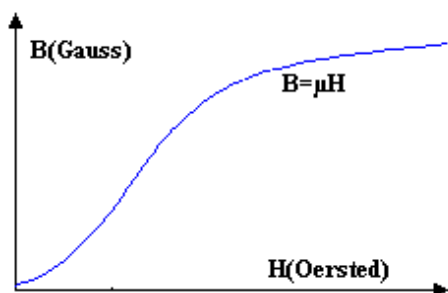


Figura 10-1. Curva B vs H.

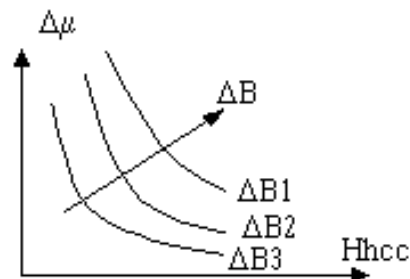


Figura 10-2. Curva  $\Delta\mu$  vs  $H_{hcc}$ .

En primer lugar se elige un valor de inducción alterna  $\Delta B_1$ . Usando la curva **B-H** del material en estudio, se adopta un valor de  $H_{total}$ , por ejemplo  $H_{t1}$ , y desde él se trazan rectas con pendientes  $(l_a/l_h)_i$ , correspondiendo cada una a un determinado entrehierro, de tal manera de barrer toda la curva (Figura 10-3).-

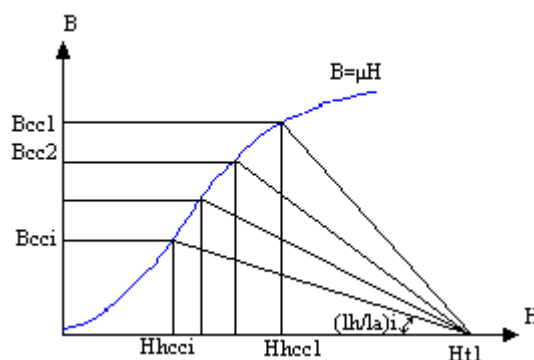


Figura 10-3

La intersección de la recta de pendiente  $(l_a/l_h)_1$  con la curva **B-H** permite determinar  $H_{hcc1}$  y  $B_{cc1}$ ; la de pendiente  $(l_a/l_h)_2$  da  $H_{hcc2}$  y  $B_{cc2}$  y así siguiendo de tal manera de explorar toda la curva  $B=f(H)$ .-

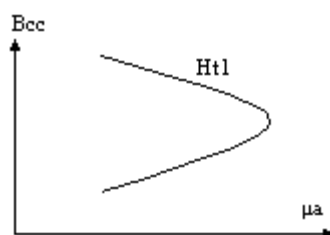


Figura 10-4.  $B_{cc}=f(\mu_a)$ .

Una vez hecho esto, se puede representar en otro gráfico el valor de  $B_{cc}=f(\mu_a)$  con  $H_{t1}$  como parámetro (Figura 10-4).-

De la Figura 10-3 se advierte que para un valor de  $(l_a/l_h)_i$  corresponde uno de  $H_{hcci}$  y otro de  $B_{cci}$ .-

La curva de la Figura 10-4 se traza así: para el  $\Delta B_i$  elegido al principio y con cada valor de  $H_{hcc1}$  se determina la curva de la Figura 10-2 el valor de  $\Delta\mu_i$ . Con éste y con el correspondiente  $(l_a/l_h)_i$ , se calcula el valor de:

$$\mu a_i = \frac{1}{\frac{1}{\Delta\mu_i} + \left(\frac{l_a}{l_h}\right)_i}$$

Luego se representa  $B_{cci}=f(\mu_{ai})$  (Figura 10-4).-

Si se realiza este mismo trabajo para otros valores de  $H_{t2}$ ,  $H_{t3}$ , ..., etc.; se tendrá una familia de curvas con parámetro  $H_{tk}$  como se muestra en la Figura 10-5.-

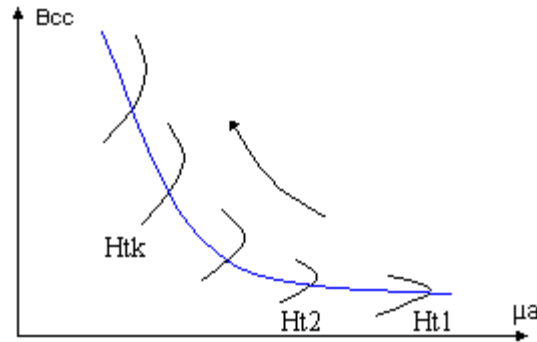


Figura 10-5. Curvas  $I_a/I_h$  vs  $\mu_a$  con  $H_t$  como parámetro.

Si se observa detenidamente esta figura se advierte que cada curva tiene un valor máximo de  $\mu_a$  que es el que dará máxima inductancia y por lo tanto el único que interesa. Si se unen estos máximos y se independiza el valor de  $B_{cc}$ , se puede representar la curva de  $\mu_a = f(H_t)$  como se muestra en la Figura 10-6.-

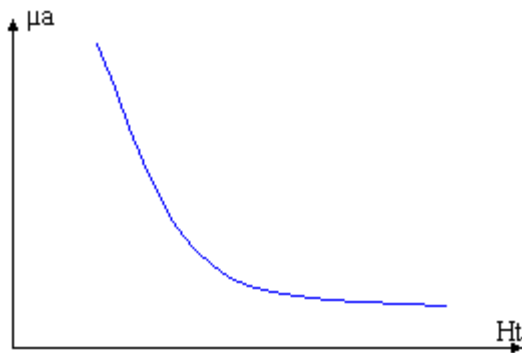


Figura 10-6

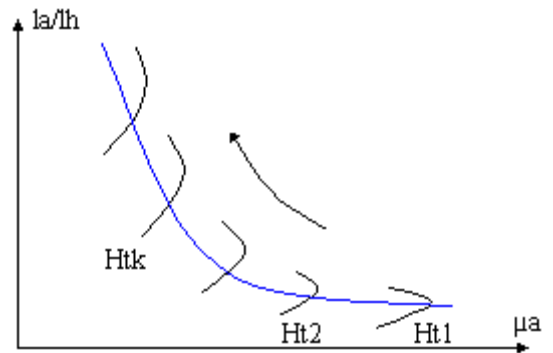


Figura 10-7. Curvas  $I_a/I_h$  vs  $\mu_a$  con  $H_t$  como parámetro.

En forma análoga a como se representó en las Figura 10-5 y Figura 10-6  $B_{cc}=f(\mu_a)$  con parámetro  $H_t$  y luego  $\mu_a=f(H_t)$ , se puede hacer ahora la representación de  $(I_a/I_h)=f(\mu_a)$  con el mismo parámetro  $H_t$  y se obtendrán curvas como las de la Figura 10-7. Para determinar los valores necesarios para construir esta figura no es necesario hacer una construcción similar a la Figura 10-3 pues se realiza con los mismos valores que ya se tenían de  $(I_a/I_h)_i$ ,  $\mu_{ai}$  y  $H_{tk}$ .-

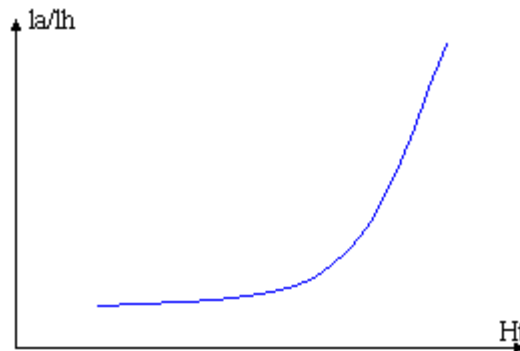


Figura 10-8

Nuevamente se unen los puntos de interés que son los de máximo  $\mu_a$  y se independiza del parámetro  $\mu_a$  representándose gráficamente  $(I_a/I_h)=f(H_t)$  como se muestra en la Figura 10-8.-

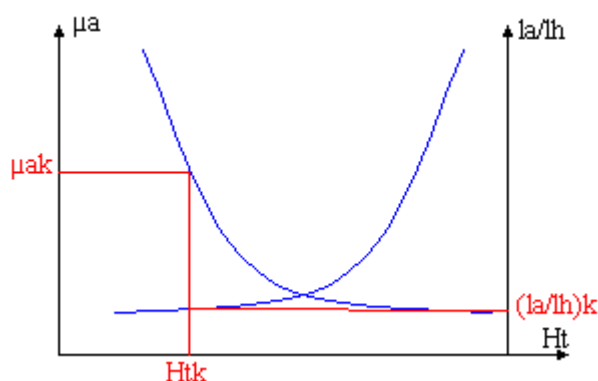


Figura 10-9

En la Figura 10-9 se representan en un mismo gráfico las Figura 10-6 y Figura 10-8 y se puede ver que para cada valor de:

$$\text{Ec. 10-3} \quad H_{tk} = \frac{0,4 \cdot p \cdot N \cdot I_{cc}}{\ell_h}$$

se tiene el correspondiente de la permeabilidad aparente máxima ( $\mu_{ak}$ ) y también el de  $(I_a/I_h)_k$  que la hace máxima.-

Lo que se busca es representar la Ec. 10-2 y para ello se hará un paso intermedio graficando

$$\frac{L \cdot I_{cc}^2}{V_h} = f\left(\frac{N \cdot I_{cc}}{\ell_h}\right)$$

con  $\Delta B$  y  $(I_a/I_h)$  como parámetros valiéndose de las curvas de Figura 10-9.-

Para un valor cualquiera de  $H_{t1}$  se determina de la Figura 10-9 el valor de  $\mu_{a1}$  y de la Ec. 10-3 se tiene:

$$\left(\frac{N \cdot I_{cc}}{\ell_h}\right) = \frac{H_{t1}}{0,4 \cdot p}$$

Estos dos valores se introducen en la Ec. 10-2 y se calcula el valor de  $(L \cdot I_{cc}^2/V_h)_1$ .-

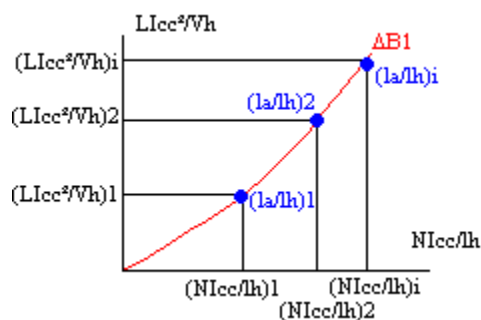


Figura 10-10

Estos valores de  $(L \cdot I_{cc}^2/V_h)_1$  y  $(N \cdot I_{cc}/\ell_h)_1$  se llevan a un gráfico como el de la Figura 10-10 y al lado se anota el correspondiente valor de  $(I_a/I_h)_1$  que sale de la Figura 10-9 y para el mismo  $H_{t1}$ .-

El mismo proceso se repite con otro valor de  $H_{t2}$  y se determina  $\mu_{a2}$ ,  $(N \cdot I_{cc}/\ell_h)_2$ ,  $(L \cdot I_{cc}^2/V_h)_2$  y  $(I_a/I_h)_2$  lo cual permite ubicar otro punto en la Figura 10-10.-

Siguiendo así con todos los  $H_{tk}$  que se quieran, se construye una curva que sirve para el  $\Delta B_1$  supuesto al comienzo del trabajo y que por lo tanto se anota como parámetro intermedio.-

Realizando nuevamente todo el proceso aquí explicado y partiendo de otros valores  $\Delta B_2, \Delta B_3, \dots, \Delta B_j$  se puede obtener la familia de curvas como la que se representa en la Figura 10-11.-

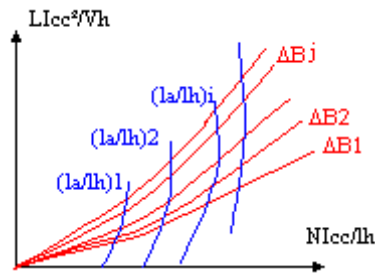


Figura 10-11. Familia de curvas para  $\Delta B_x$ .

Como todas las curvas tienen acotado el valor de  $(I_a/I_h)$ , se puede unir todos los puntos iguales de este otro parámetro con línea según se muestra en la misma figura.-

### 10.1.1.3 Curvas finales

Como se explicó anteriormente estas curvas no se adaptan exactamente al proyecto pues están dadas en función de un parámetro,  $\Delta B$ , el cual es función de  $N$  que no se conoce todavía (Ec. 10-4). Por lo tanto, para obtener las definitivas y más adecuadas, se debe hacer una conversión del parámetro  $\Delta B$  que se realiza de la siguiente manera:

Se sabe que la inducción alterna es:

$$\text{Ec. 10-4} \quad \Delta B = \frac{\hat{E}_{ca} \cdot 10^8}{w \cdot N \cdot S} \text{ (Gauss)}$$

Si multiplicamos miembro a miembro por  $N \cdot I_{cc}/I_h$  queda un nuevo valor:

$$\text{Ec. 10-5} \quad M = \frac{\Delta B \cdot N \cdot I_{cc}}{\ell_h} = \frac{\hat{E}_{ca} \cdot 10^8 \cdot N \cdot I_{cc}}{w \cdot N \cdot S \cdot \ell_h} = \frac{\hat{E}_{ca} \cdot I_{cc} \cdot 10^8}{w \cdot V_h}$$

Este último miembro muestra que el parámetro  $M$  es función de los datos del problema y de  $V_h$ , único valor adoptado por el proyectista.-

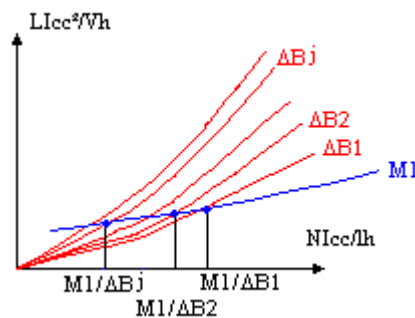


Figura 10-12.

Se busca entonces cambiar en las curvas obtenidas últimamente, el parámetro  $\Delta B$  por el  $M$ , que ya no es más función del número de espiras  $N$ , quedando el  $(I_a/I_h)$  inalterado.-

Se elige un valor cualquiera de  $M$ , por ejemplo  $M_1$  y se calcula de la Ec. 10-5.-

$$\frac{M_1}{\Delta B_1} = \left( \frac{N \cdot I_{cc}}{\ell_h} \right)_1$$

Con este valor de  $(N \cdot I_{cc}/I_h)_1$  se entra en abscisas a la Figura 10-12 y donde corta a la curva correspondiente a  $\Delta B_1$  se tiene un punto de la nueva curva de parámetro  $M$ .

Se realiza lo mismo para otro valor de  $\Delta B_2$ , sacando  $(N \cdot I_{cc}/I_h)_2 = M_1/\Delta B_2$  y donde corta a la curva de  $\Delta B_2$  se obtiene otro punto. Así siguiendo con otros valores  $\Delta B_j$ , se obtiene la nueva curva de parámetro  $M_1$ .

Luego se adoptan otros valores de  $M_2, M_3, \dots, M_i$  y se sacan cuantas curvas se desee (Figura 10-13).-

Con el propósito de trabajar con valores más prácticos en las curvas finales se dividió  $M$  por 1000 y por eso la Ec. 10-5 quedó escrita de la siguiente manera:

$$M = \frac{\hat{E}_{ca} \cdot I_{cc} \cdot 10^5}{w \cdot V_h}$$

Como se puede apreciar, la obtención de estos gráficos es sumamente laboriosa y sólo realizable en forma práctica por medio de una computadora.-

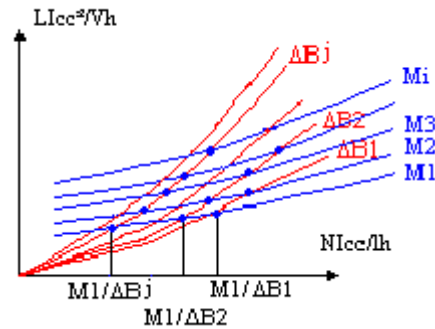


Figura 10-13



Reeditado, corregido y compaginado  
durante el periodo 10/98 y 5/99  
por los alumnos  
Araguás Gastón  
Baldassi Víctor  
Gonzalez Darío  
Molina Juan  
Scidá José  
Steiner Guillermo  
de la carrera Ingeniería Electrónica  
Facultad Córdoba  
Universidad Tecnológica Nacional.

Fecha de Impresión 28 de Mayo de 1999, Córdoba, Argentina

