

## ANEXO 1

**Tabla 7.1:** Características de conductores circulares

AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm <sup>2</sup> )	Doble Capa (mm)
7	3,665007709	10,54968922	3,769
8	3,263677785	8,365741333	3,3600
9	2,906058863	6,632827379	3,0000
10	2,587813541	5,259637868	2,6800
11	2,304834805	4,172241978	2,3900
12	2,052536351	3,308808221	2,1400
13	1,827743003	2,623736043	1,9100
14	1,627783303	2,081052612	1,7100
15	1,449583112	1,650350248	1,5300
16	1,290911311	1,30882835	1,3700
17	1,149474056	1,037739215	1,2300
18	1,023592995	0,822895128	1,1000
19	0,911574385	0,65264063	0,9830
20	0,812006913	0,517856384	0,8790
21	0,722942402	0,410484985	0,787
22	0,643829698	0,325560639	0,704
23	0,573331965	0,258167871	0,632
24	0,5105346	0,204710558	0,569
25	0,454653292	0,162349353	0,511
26	0,404889398	0,128754581	0,457
27	0,360555075	0,102101731	0,409
28	0,321087021	0,080972096	0,366
29	0,285905256	0,064199872	0,33
30	0,25463499	0,050924414	0,295
31	0,226757712	0,040384435	0,267
32	0,201941944	0,032028968	0,241

## ANEXO 2

**Tabla 7.2:** Características de conductores rectangulares tipo foil

BWG	Espesor (mm)
16	1,615
18	1,245
19	1,07
20	0,889
22	0,711
24	0,559
26	0,457
28	0,357
30	0,305
32	0,229
34	0,178
36	0,102
38	0,051

### ANEXO 3

**Tabla 7.3:** Distancias mínimas de los aislamientos de los arrollados y el núcleo

Clase de Aislamiento	BIL	Potencial Aplicado	Aislamiento Radial BT ~ AT y Bobinas ~ Núcleo				Total de Tolerancia	Collar	Aislamiento del Yugo	Aislamiento Bobina ~ Tanque
			Tubo de Papel	Ducto de Aceite	Envolvente	Milímetros				
1,2	30	10	1,5			1,7	6,5	1,5	15	
5	60	19		3	1	4,5	6,5	2	20	
8,7	70	26	0,4	3	1	4,9	10	2	25	
15	95	34	0,9	3	1	5,5	13	2	28	
15	110	40	1,4	3	1	6	20	3	30	
25	150	50	2,5	3	1,8	8,3	32	4,5	40	
34,5	200	70	4,8	3	1,8	10,8	51	4,5	50	

## ANEXO 4

**Tabla 7.4:** Tensión de prueba según la tensión del devanado primario

Arrollamiento a probar con tensión nominal	Tensión de prueba	Duración de la prueba [minutos]
$U_n < 1000 V$	$2 * U_n + 1000 V$ $U_{n_{\text{mínimo}}} = 2.5 kV$	1
$1 kV < U_n \leq 10 kV$	$3.25 * U_n$	1
$10 kV < U_n \leq 60 kV$	$1.75 * U_n + 15 [kV]$	1
$U_n > 60 kV$	$2 * U_n$	1

## ANEXO 5

**Tabla 7.5:** Volúmenes, Áreas de transferencia térmica y peso para radiadores de “N” elementos de altura (800,1000,1200)mm. Ancho 381 mm y calibre lamina 1.2 mm.

N° ELEMENTOS	Altura = 800 mm.			Altura = 1000 mm.			Altura = 1200 mm.		
	AREA M <sup>2</sup>	VOLUMEN Lts	PESO Kg	AREA M <sup>2</sup>	VOLUMEN Lts	PESO Kg	AREA M <sup>2</sup>	VOLUMEN Lts	PESO Kg
1	0.70	3.42	5.5	0.87	4.02	6.85	0.99	4.47	8.22
2	1.38	6.32	11.0	1.70	7.52	13.70	1.95	8.46	16.44
3	2.05	9.23	16.5	2.54	11.03	20.55	2.91	12.39	24.66
4	2.73	12.13	22.0	3.38	14.55	27.40	3.87	16.36	32.88
5	3.40	15.03	27.5	4.22	18.06	34.25	4.83	20.33	41.10
6	4.08	17.94	33.0	5.05	21.58	41.10	5.79	24.30	49.32
7	4.75	20.84	38.5	5.89	25.06	47.95	6.75	28.27	57.54
8	5.43	23.75	44.0	6.73	28.57	54.80	7.71	32.24	65.76
9	6.10	26.65	49.5	7.57	32.13	61.65	8.67	36.21	73.98
10	6.78	29.55	55.0	8.41	35.60	68.50	9.63	40.14	82.20
11	7.45	32.46	60.5	9.24	39.12	75.35	10.59	44.11	90.42
12	8.13	35.36	66.0	10.08	42.63	82.20	11.55	48.00	98.64

## ANEXO 6

### APENDICE

#### A-1: Potencia de una columna

La relación entre la sección de la columna del núcleo y la potencia del transformador, se obtiene:

$$P_n = V_n * I_n$$

Además:

$$V_n = 4.44 * N * f * \beta_{max} * A_o$$

Sustituyendo en la primera ecuación:

$$P_n = 4.44 * N * f * \beta_{max} * A_o * I_n$$

Se cumple también que:

$$N * I_n = S * A_{conductor}$$

Por lo que podemos escribir:

$$P_n = 4.44 * f * (\beta_{max} * A_o) * (S * A_{conductor})$$

Para una serie de transformadores del mismo tipo, la sección transversal del conductor y la sección transversal del núcleo, guardan cierta relación:

$$m = \frac{A_{conductor}}{A_o}$$

Y nos queda la potencia por columna como sigue:

$$P_n = 4.44 * f * (\beta_{max} * A_o^2) * (S * m)$$

Y haciendo:

$$4.44 * (\beta_{max}) * (S * m) = \frac{1}{K^2}$$

Nos resulta:

$$P_n = \frac{1}{K^2} * f * A_o^2$$

## A-2: Aislamiento entre las Bobinas de Alta Tensión y las de Baja Tensión

La Figura 7.1 representa la sección transversal de un arrollamiento cilíndrico.

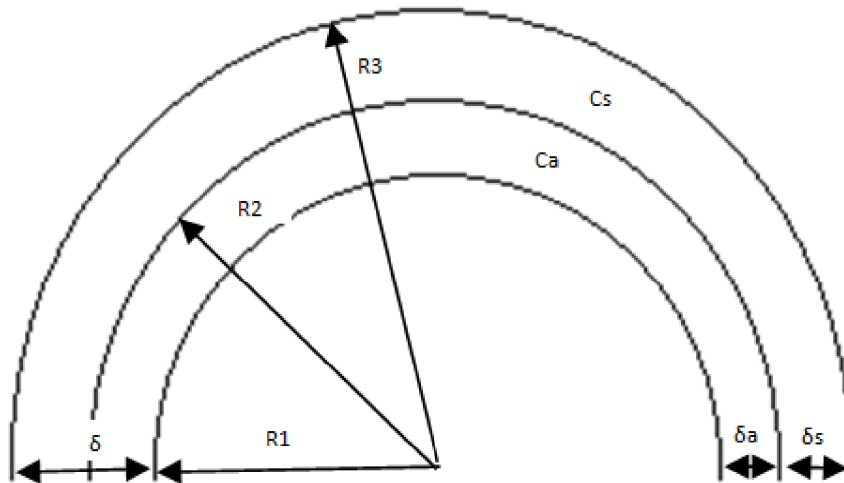


Figura 7.1: Aislamiento entre las Bobinas de Alta Tensión y las de Baja Tensión

Dónde:

- El radio vector R2 indica el límite entre los aislamientos sólidos y líquidos.
- R1 y R3 son respectivamente los radios vectores entre baja tensión y el aislamiento líquido y entre alta tensión y el aislamiento sólido.
- $\delta$  es la distancia que ocupa el aislante total compuesto.
- $\delta_a$  es la distancia que ocupa el aislante líquido.
- $\delta_s$  es la distancia que ocupa el aislante sólido.
- $C_s$  es la capacitancia producida por el aislante sólido.
- $C_a$  es la capacitancia producida por el aislante líquido.

Las capacitancias están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$C_a = \frac{E_a * L_S}{2 * Ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

$$C_s = \frac{E_s * L_S}{2 * Ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}$$

Siendo  $E_a$  y  $E_s$  los coeficientes dieléctricos de los aislamientos,  $L_s$  es la longitud del arrollamiento del transformador.

Las capacitancias  $c_a$  y  $c_s$  están conectadas en serie y se cargan con la tensión de prueba  $U_{pr}$  a los valores  $U_a$  y  $U_s$  dados por el divisor de tensión. Así:

$$U_a = \frac{c_s}{c_a + c_s} * U_{pr}$$

$$U_s = \frac{c_a}{c_a + c_s} * U_{pr}$$

Es decir:

$$U_a = \frac{1}{\frac{c_a}{c_s} + 1} * U_{pr} \quad \text{Pero} \quad \frac{c_a}{c_s} = \frac{E_a * Ln(\frac{R_3}{R_2})}{E_s * Ln(\frac{R_2}{R_1})}$$

Ósea:

$$U_a = \frac{1}{\frac{E_a * Ln(\frac{R_3}{R_2})}{E_s * Ln(\frac{R_2}{R_1})} + 1} * U_{pr}$$

Según la Figura:

$$R_3 = R_2 + \delta_s \quad \text{y} \quad R_2 = R_1 + \delta_a$$

Y la expresión de  $U_a$  queda:

$$U_a = \frac{1}{\frac{E_a * Ln(1 + \frac{\delta_s}{R_2})}{E_s * Ln(1 + \frac{\delta_s}{R_1})} + 1} * U_{pr}$$

Las relaciones  $\delta/R$  son pequeñas, por lo que las funciones logarítmicas se pueden desarrollar en serie por la serie de Taylor en el entorno del punto  $a = 1$  y aplicando la formula general del desarrollo de Taylor.

$$f(x) = f(a) + f'(a) * (x - a) + \frac{f''(a)}{2} * (x - a)^2 \dots$$

Y después de realizar los cálculos pertinentes se obtiene:

$$Ln(1 + x) = 0 + 1 * x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3}$$

Que se puede aproximar a:



$$\ln(1+x) \approx x - \frac{x^2}{2}$$

Por todo ello, podemos escribir:

$$\ln\left(1 + \frac{\delta_s}{R_2}\right) \approx \frac{\delta_s}{R_2} - \frac{\frac{\delta_s^2}{R_2^2}}{2}$$

$$\ln\left(1 + \frac{\delta_a}{R_1}\right) \approx \frac{\delta_a}{R_1} - \frac{\frac{\delta_a^2}{R_1^2}}{2}$$

Quedando  $U_a$  como sigue:

$$U_a = \frac{1}{1 + \frac{E_a}{E_s} * \frac{\frac{\delta_s}{R_2} - \frac{\frac{\delta_s^2}{R_2^2}}{2}}{\frac{\delta_a}{R_1} - \frac{\frac{\delta_a^2}{R_1^2}}{2}}} * U_{Pr}$$

El máximo campo eléctrico ocurrirá en la zona del aislamiento líquido, entre los límites  $R_1$  y  $R_2$  y su valor será:

$$E_a = \frac{U_a}{R_1 * \frac{\delta_a}{R_1} - \frac{\frac{\delta_a^2}{R_1^2}}{2}}$$

Sustituyendo en la expresión obtenida anteriormente de  $E_a$  la expresión de  $U_a$ , después de operar nos resulta:

$$E_a = \frac{U_{Pr}}{\delta_a * \left(1 - \frac{\frac{\delta_a}{R_1}}{2}\right) + \frac{E_a}{E_s} * \frac{\delta_s * R_1 * \left(1 - \frac{\frac{R_2}{R_1}}{2}\right)}{R_2}}$$

Teniendo en cuenta que  $R_1 \approx R_2$  y las relaciones  $\delta/R$  tienden a cero, simplifica  $E_a$  a:

$$E_a = \frac{U_{Pr}}{\delta_a + \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_s} * \delta_s}$$

Introduciendo la relación  $\varepsilon = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_a}$ ,  $E_a$  se reduce:

$$E_a = \frac{\varepsilon * U_{Pr}}{\varepsilon * \delta_a + \delta_s}$$

Finalmente la máxima distancia  $\delta$ , resulta ser:

$$\delta = \frac{U_{Pr}}{E_a} + \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} * \delta_s$$