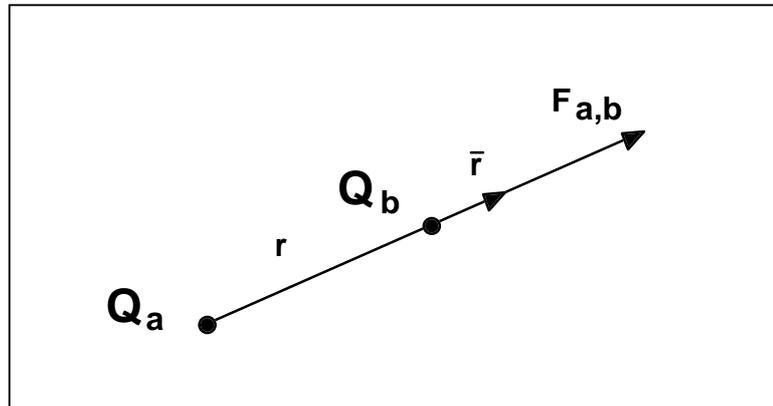


CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE BOBINAS Y TRANSFORMADORES

CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTROSTÁTICA

- Cargas puntuales



Fuerza entre dos cargas

$$F_{a,b} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q_a \cdot Q_b}{r^2} \cdot \vec{r} \quad [N]$$

Intensidad de campo eléctrico

$$E_{a,b} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q_a}{r^2} \cdot \vec{r} \quad [V/m]$$

Constante dieléctrica del vacío

$$\epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

E : campo Newtoniano

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = 0$$

Integrando las ecuaciones de Maxwell

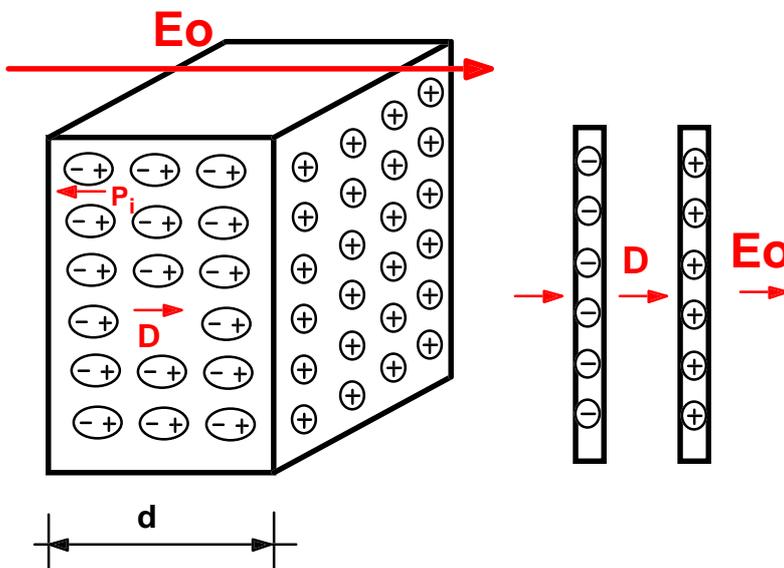
$$\bar{E} = -\operatorname{grad} V$$

V : potencial electrostático

$$V_a - V_b = \int_a^b (-\bar{E}) \cdot d\mathbf{l} = \int_b^a (\bar{E}) \cdot d\mathbf{l}$$

V : trabajo para mover una carga a velocidad constante de A a B

MATERIALES DIELECTRICOS



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

$$\bar{P} = \chi_e \cdot \epsilon_0 \cdot \bar{E}$$

De donde

$$\bar{D} = \epsilon_0 \cdot \bar{E} \cdot (1 + \chi_e)$$

T^{ma} de Gauss

$$\oiint_{S, cerrada} \bar{D} \cdot ds = Q_{encerrada}$$

$$D \cdot s = \sigma_f \cdot s \Rightarrow D = \sigma_f$$

Donde σ_f es la densidad de carga libre

$$D = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E \Rightarrow E = \frac{\sigma_f}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$

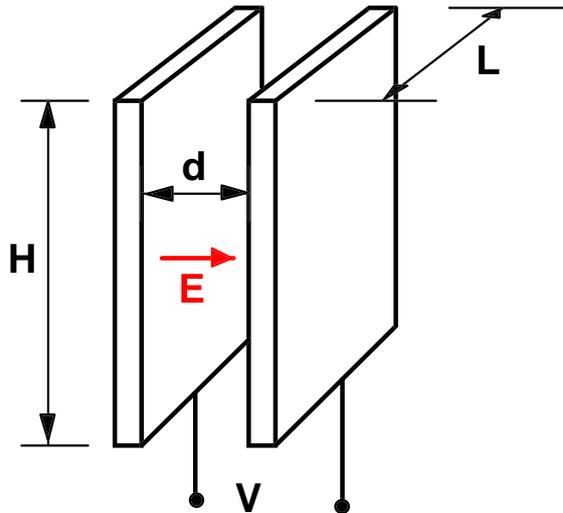
$$E = -\text{grad} V \Rightarrow E = \frac{dV}{dx} \Rightarrow V = \frac{\sigma_f}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot d$$

De donde

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\sigma_f \cdot s}{\frac{\sigma_f}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot d} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{s}{d}$$

ENERGÍA ASOCIADA A UN CAMPO ELÉCTRICO

$$\varepsilon = \iiint_v \frac{\bar{E} \cdot \bar{D}}{2} \cdot dv = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \iiint_v E^2 \cdot dv$$



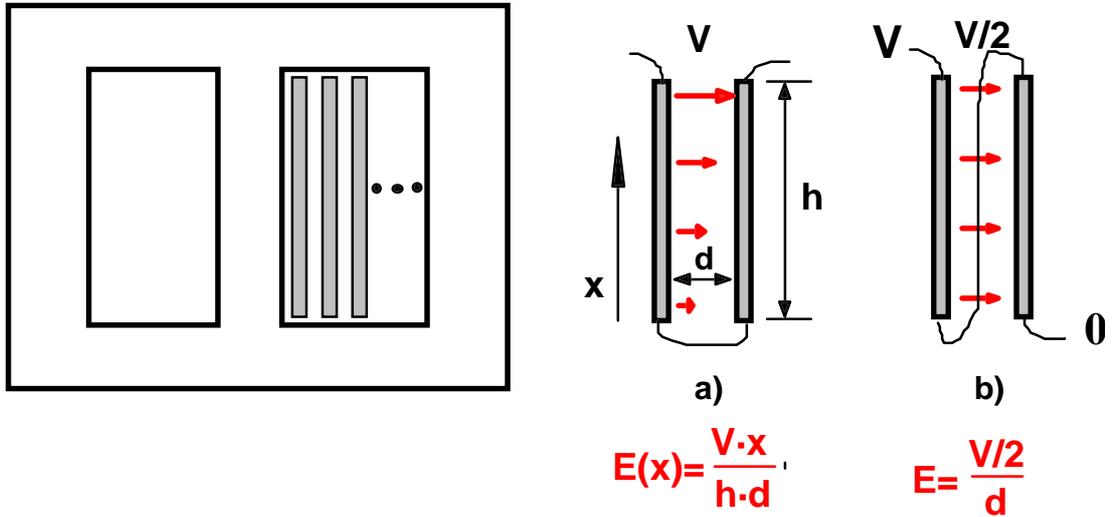
Ambas placas están a igual tensión por lo que el campo E es constante a lo largo de toda la superficie

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \iiint_v \frac{V^2}{d^2} \cdot dv = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot V^2 \cdot \frac{s}{d}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot C_{eq} \cdot V^2$$

$$C_{eq} = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{s}{d}$$

Según la estrategia de devanar las capacidades parásitas cambian.



Consideremos placas planas de sección S y longitud l .

Caso a)

El campo eléctrico depende de "x"

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \iiint \left(\frac{V \cdot x}{h \cdot d} \right)^2 \cdot dv = \frac{1}{6} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot V^2 \cdot \frac{S}{d}$$

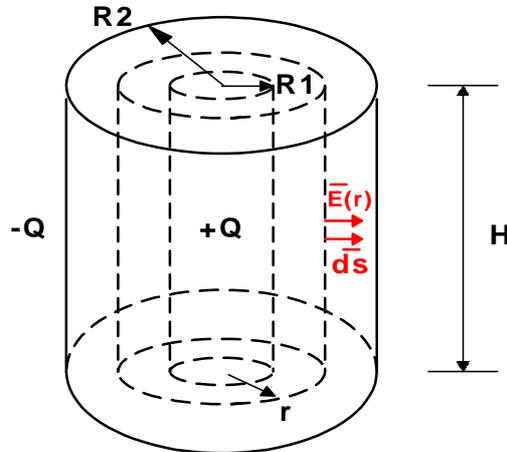
$$C_{eq} = \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

Caso b)

El campo eléctrico no depende de "x"

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \iiint \frac{V^2}{4 \cdot d^2} \cdot dv = \frac{1}{8} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot V^2 \cdot \frac{S}{d}$$

$$C_{eq} = \frac{1}{4} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

Condensador cilíndrico

Aplicando el Teorema de Gauss a un condensador cilíndrico sometido a una tensión V , tenemos:

$$\oiint_{S, cerrada} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q_{libre}}{\epsilon}$$

$$E = \frac{Q}{2 \cdot \pi \epsilon \cdot H \cdot r}$$

$$V = \int \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot H} \cdot \ln \frac{R2}{R1}$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot H}{\ln \left(\frac{R2}{R1} \right)}$$

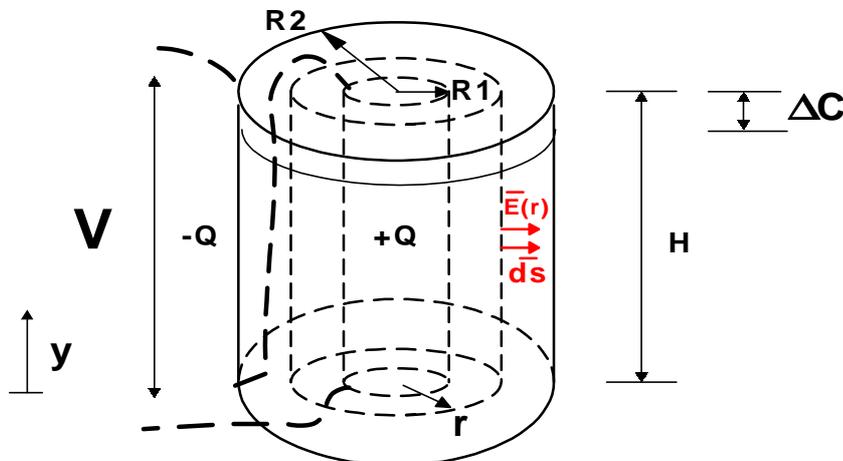
O también

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \iiint E(r)^2 \cdot dv = \frac{Q^2}{\varepsilon \cdot 2 \cdot \pi \cdot H} \cdot \ln\left(\frac{R2}{R1}\right)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot C_{eq} \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot C_{eq} \cdot \frac{Q^2}{C_{eq}^2}$$

$$C_{eq} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot H}{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}$$

Si el condensador esta formado por dos capas de conductores unidos como se indica en la figura y sometidos a la tensión V , el condensador equivalente será:



Tomemos un diferencial de condensador ΔC :

$$\Delta C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \Delta y}{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}$$

La energía almacenada en este condensador diferencial será:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot \Delta C \cdot \left(\frac{V}{2}\right)^2$$

Integrando a lo largo de la altura H, tendremos:

$$W = \int_0^H dW = \frac{1}{2} \cdot \int_0^H \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot dy}{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)} \cdot \frac{V^2}{4} = \frac{\pi \cdot \epsilon \cdot H \cdot V^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}$$

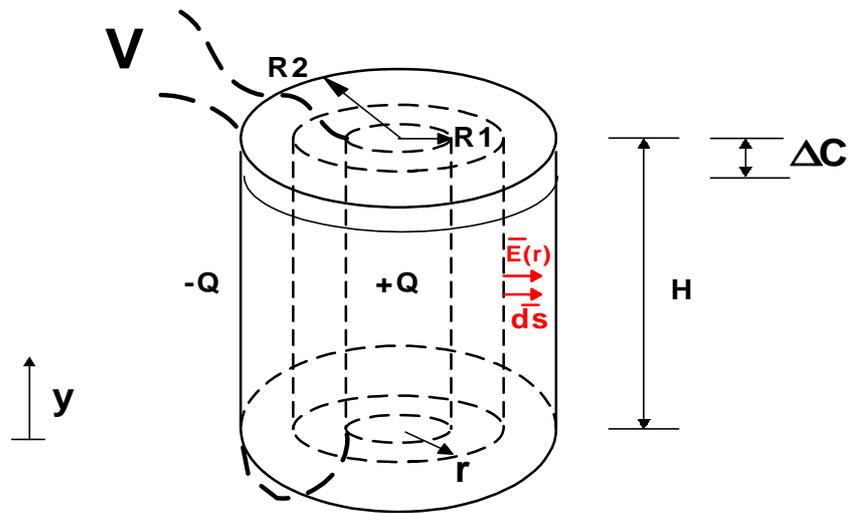
La energía almacenada en un condensador equivalente es

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_{eq} \cdot V^2$$

De donde se deduce la capacidad equivalente

$$C_{eq} = \frac{\pi \cdot \epsilon \cdot H}{2 \cdot \ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}$$

Si por el contrario las conexiones entre devanados son las mostradas en la figura:



El perfil de tensiones a lo largo del eje y será como el indicado en el caso a): $V(y)=V \cdot y/H$

Siguiendo el mismo proceso que es el caso anterior tendremos:

$$\Delta C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \Delta y}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

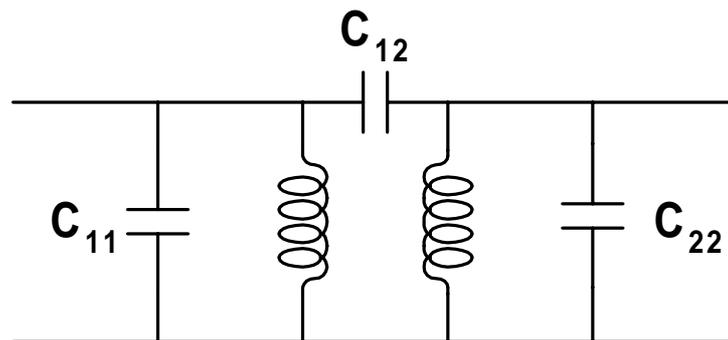
$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot \Delta C \cdot \left(\frac{V \cdot y}{H}\right)^2$$

$$W = \int_0^H dW = \frac{1}{2} \cdot \int_0^H \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot dy}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \cdot \frac{V^2 \cdot y^2}{H^2} = \frac{\pi \cdot \epsilon \cdot H \cdot V^2}{3 \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

Finalmente igualando la expresión anterior a la energía almacenada en un condensador C_{eq} sometido a la tensión V , obtendremos el valor de C_{eq} :

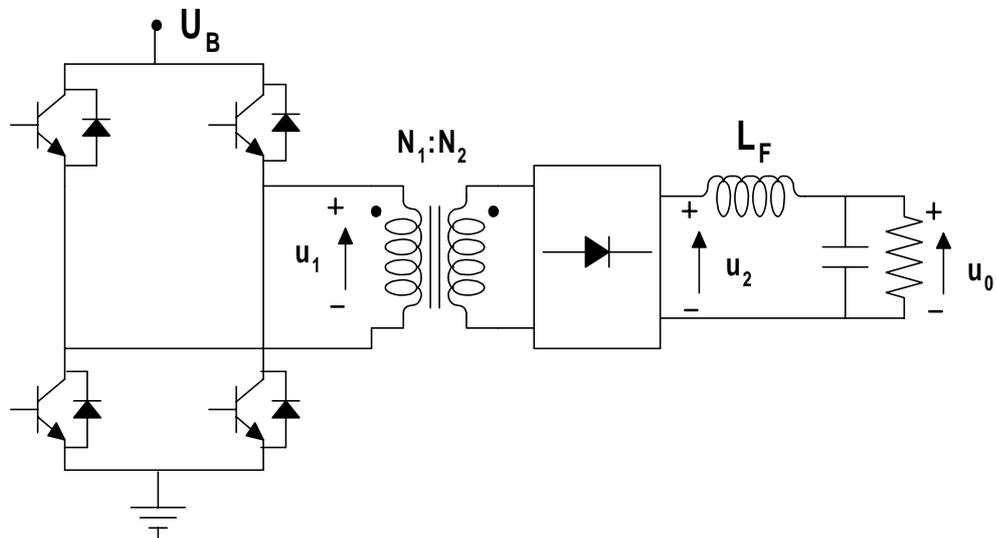
$$C_{eq} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot H}{3 \cdot \ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}$$

Las técnicas de interleaving:



- Aumentan la capacidad entre devanados C_{12} (*se reduce la distancia entre ellos*)
- Disminuyen la capacidad propia C_{11} , C_{22}

Ejemplo de diseño:



Convertidor en puente completo

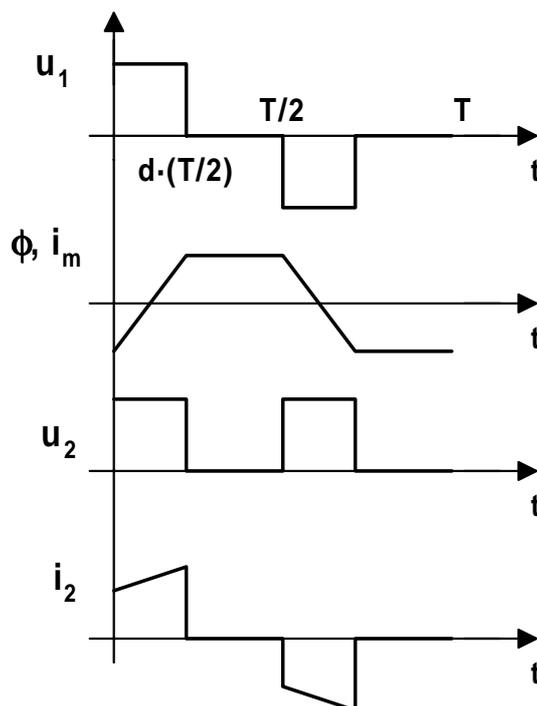
V_i : 83-365 V (eficaces)

V_o : 12 V (DC)

P_o : 100 W

F_c : 100kHz

Asignaremos inicialmente el 10 % de pérdidas a los semiconductores y otro 10 % a los magnéticos.



a) Diseño del transformador de aislamiento

1º) Determinar el ciclo de trabajo del convertidor

$$M=d \cdot (N_2/N_1)$$

$$r_t = N_1/N_2 = 8$$

$$U_{Bmax} = 516 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad d = 0.18$$

$$U_B = 311 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad d = 0.3$$

$$U_{Bmin} = 117 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad d = 0.82$$

2º) Determinar los valores de corriente y tensión que deben ser manejados por los magnéticos

Corriente eficaz por el secundario

$$i_2 = I_0 \cdot \sqrt{d} \approx 4.56 \text{ A}$$

(suponemos despreciables los rizados de corriente debidos a la L_F y L_m)

Corriente eficaz por el primario

$$I_1 = I_2 / r_t \approx 0.57 \text{ A}$$

3º) Selección de los conductores

Objetivo: minimizar los efectos de la alta frecuencia

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f_c}}$$

$$\delta (100\text{kHz}) = 0.24 \text{ mm}$$

PRIMARIO: hilo redondo de ϕ 0.15 mm

SECUNDARIO: Hilo litz 400x ϕ 0.04mm

4º) Selección del material magnético

**Objetivo: minimizar las pérdidas en alta frecuencia
Evitar la saturación del núcleo**

3F3 PHILIPS

$$P_n(W / m^3) = C_m \cdot f_c^x \cdot B_{ac}^y \cdot (c_t - c_{t1} \cdot T + c_{t2} \cdot T^2)$$

Entre 20 – 300 kHz

$$C_m=0.25, x=1.6, y=2.5, c_t=1.26, c_{t1}=1.05 \cdot 10^{-2}, c_{t2}=0.79 \cdot 10^{-4}$$

Saturación $B_s=0.3$ T

$$B_{max}(N1) = \frac{U_{max} \cdot d}{4 \cdot f_c \cdot N1 \cdot A_e}$$

5º) Evaluación de las pérdidas en el núcleo

$$P_n(N1) = 0.25 \cdot f_c^{1.6} \cdot \left(U_B \cdot d \cdot \frac{\sqrt{9 - 6 \cdot d}}{12 \cdot f_c \cdot N1 \cdot A_e} \right) V_e$$

$$P_n(N1) = K1/N1$$

6º) Evaluación de las pérdidas en el cobre

$$P_{cu}(N1) = \rho_{Cu} \cdot \frac{N1 \cdot l_{m1}}{\pi \cdot \left(\frac{\phi_1}{4}\right)^2} \cdot I_1^2 + \rho_{Cu} \cdot \frac{\frac{N1}{r_t} \cdot l_{m2}}{\pi \cdot \left(\frac{\phi_2}{4}\right)^2 \cdot 400} \cdot (I_1 \cdot r_t)^2$$

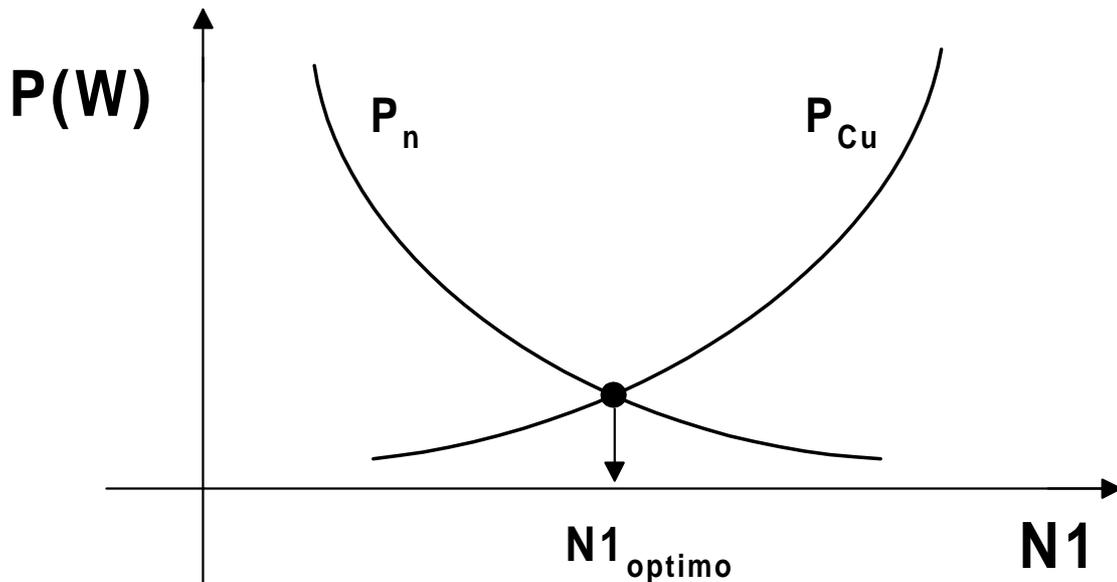
$$P_{Cu}(N1)=K1 \cdot N1$$

Pérdidas totales

$$P_T(N1)= P_{Cu}(N1)+ P_n(N1)$$

El mínimo se obtiene cuando

$$P_{Cu}(N1)=P_n(N1)$$



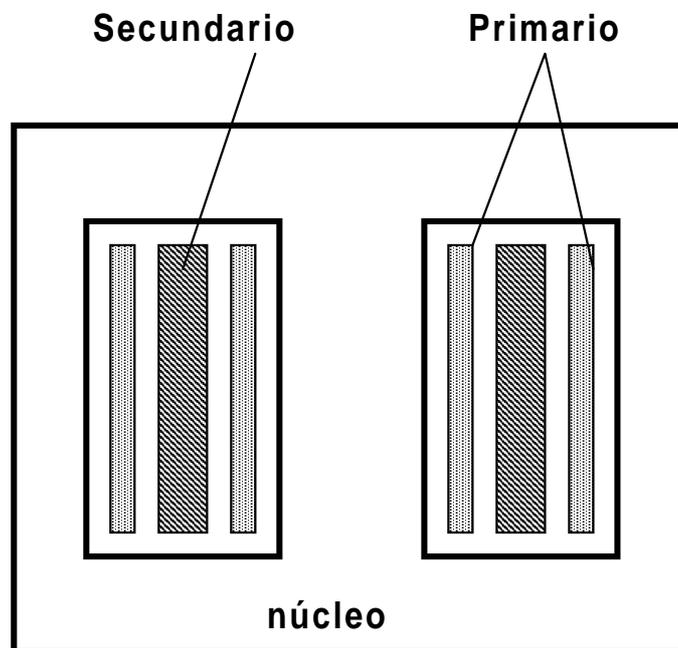
Inductancia magnetizante:

$$Lm(N1) = \frac{N1^2 \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A_e}{l_e}$$

Corriente magnetizante:

$$I_m(N1) = \frac{U_B \cdot d}{4 \cdot L_m(N1) \cdot f_c}$$

7º) Disposición de los devanados



El primario se divide en dos capas en paralelo para minimizar la inductancia de dispersión.

Fichero Mathcad

$I_{eff} := 0.6$
 $r_t := 8$
 $f := 100 \cdot 10^3$
 $U_b := 311$
 $d := 0.3$
 $\rho_{cu} := 1.7 \cdot 10^{-8}$
 $capas := 2$ numero de capas en paralelo del primario

Datos del núcleo

$V_e := 574 \cdot 10^{-9}$
 $A_e := 24.8 \cdot 10^{-6}$
 $\phi_c := 5 \cdot 10^{-3}$
 $\mu_r := 2000$
 $\mu_o := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$
 $l_e := 23.2 \cdot 10^{-3}$
 $h := 6.3 \cdot 10^{-3}$

Datos conductores

$\phi_1 := 0.15 \cdot 10^{-3}$
 $\phi_2 := 0.04 \cdot 10^{-3}$

Cálculo de pérdidas en el cobre

$$P_{cu1}(N1) := \rho_{cu} \cdot \frac{N1 \cdot \pi \cdot \phi_c}{\pi \cdot \left(\frac{\phi_1}{4}\right)^2} \cdot \frac{1}{capas} \cdot I_{eff}^2$$

$$B_{max}(N1) := \frac{U_b \cdot d}{4 \cdot f \cdot N1 \cdot A_e}$$

$$L_m(N1) := \frac{N1^2 \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A_e}{l_e}$$

$$P_{cu2}(N1) := \rho_{cu} \cdot \frac{\frac{N1}{r_t} \cdot \pi \cdot (\phi_c + 2 \cdot 0.2 \cdot 10^{-3})}{\pi \cdot \left(\frac{\phi_2}{4}\right)^2 \cdot 400} \cdot (I_{eff} \cdot r_t)^2$$

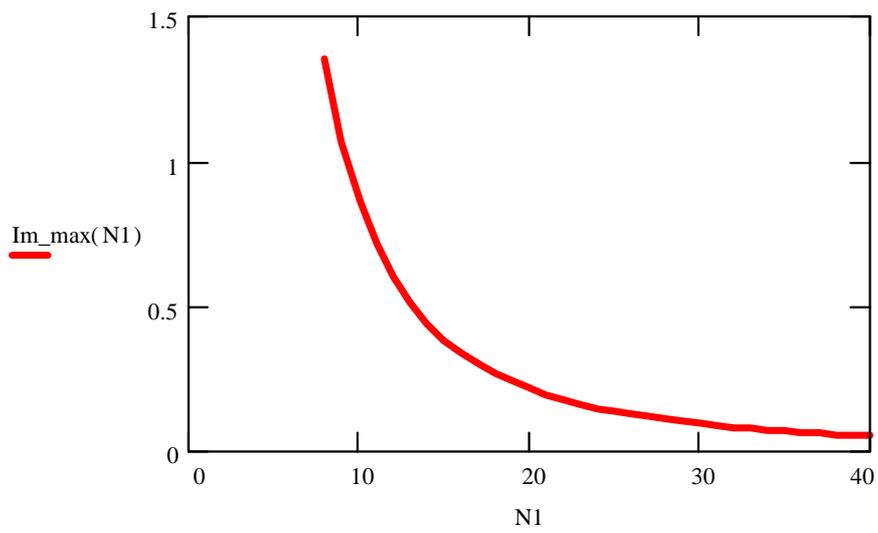
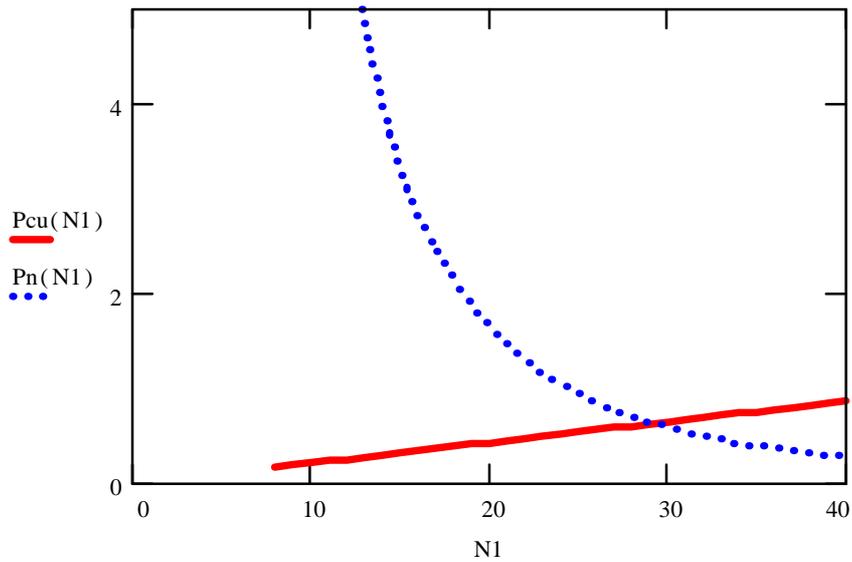
$$I_{m_max}(N1) := \frac{U_b \cdot d}{4 \cdot L_m(N1) \cdot f}$$

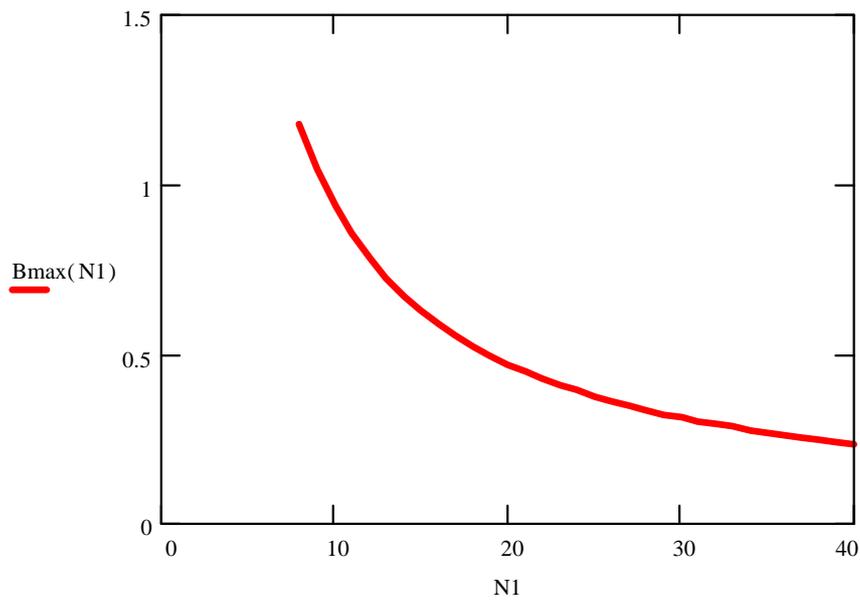
$$P_{cu}(N1) := P_{cu1}(N1) + P_{cu2}(N1)$$

Cálculo de pérdidas en el núcleo

$$P_n(N1) := 0.25 \cdot (f)^{1.6} \cdot \left(\frac{U_b \cdot d}{12 \cdot f \cdot N1 \cdot A_e} \cdot \sqrt{9 - 6 \cdot d} \right)^{2.5} \cdot V_e$$

$N1 := 8,9..40$





A la vista de las anteriores gráficas se selecciona:

Núcleo RM5

$N1=32$ (dos capas en paralelo)

$N2=8$

Pérdidas totales $P_T=1.2$ W

b)Diseño de la bobina

A partir del rizado de corriente ($i_r=1A$) se determina el valor de L_F

$$L_F = \frac{U_B - V_O}{2 \cdot i_r} \cdot d \cdot T$$

$$U_B=516 \text{ V, } d=0.18 \quad \Rightarrow \quad L_F=0.45\text{mH}$$

A partir de éste valor se ha de determinar el número de espiras N y el entrehierro necesarios para obtener el valor deseado de L_F .

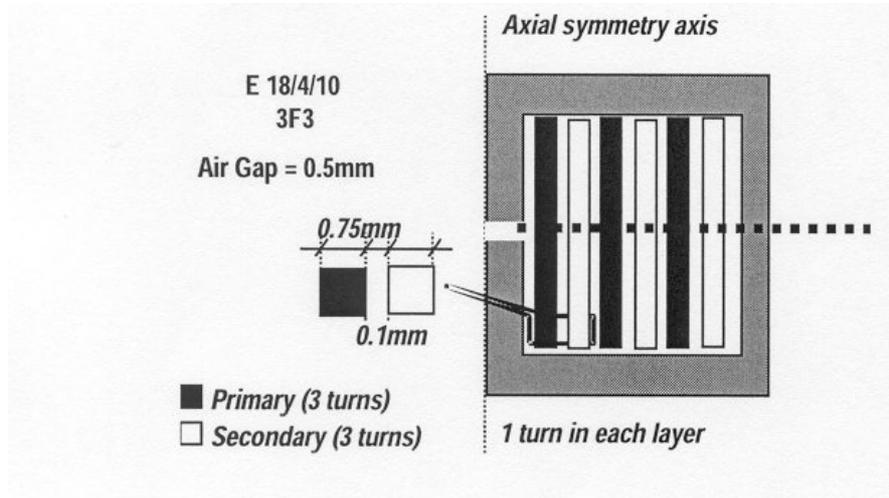
$$L = \frac{N^2}{\frac{l_e}{\mu \cdot A_e} + \frac{g}{\mu_o \cdot A_e}}$$

$$B_{max} = \frac{N \cdot I_{max}}{\frac{l_e}{\mu} + \frac{g}{\mu_o}}$$

El cálculo sigue un proceso iterativo similar al realizado con el transformador.

EJEMPLO:

Transformador para flyback:



**Resultados en función de la estrategia de devanado:
(Corriente neta por los devanados 2 A)**

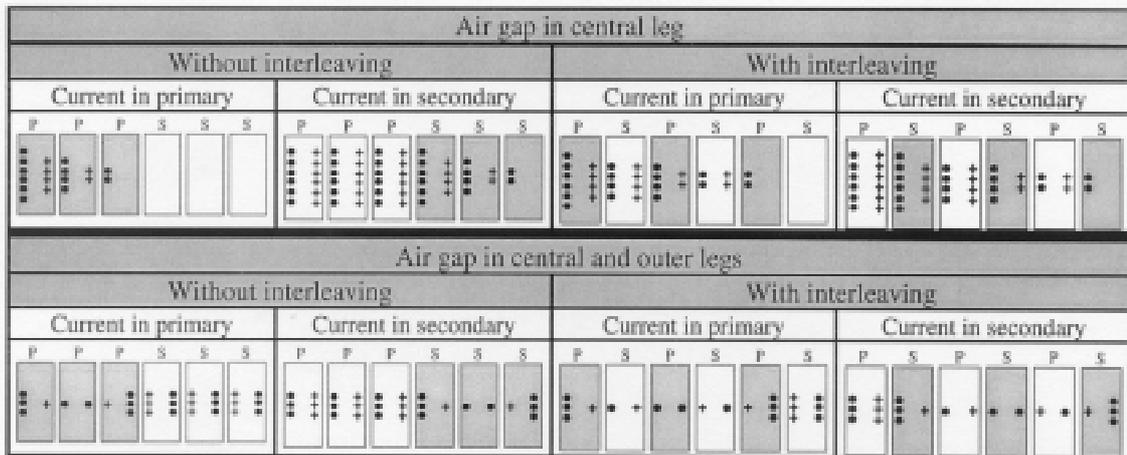
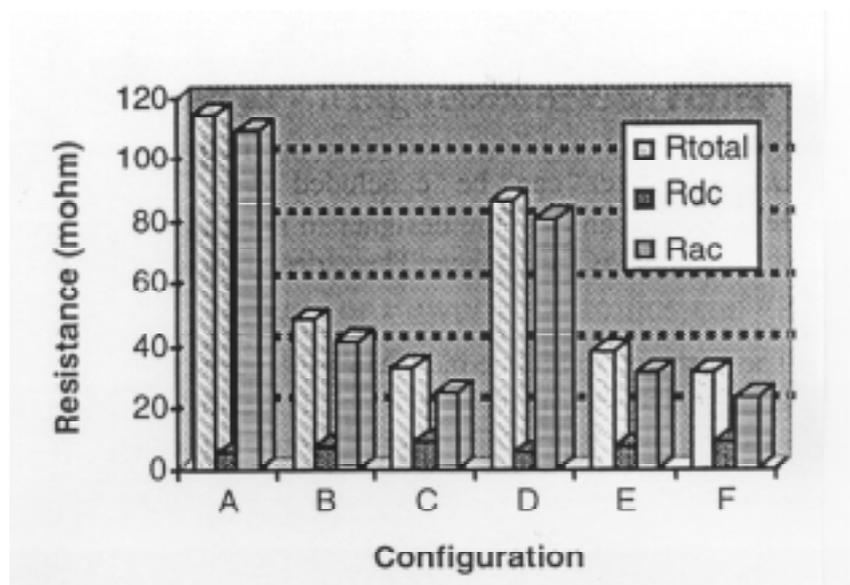
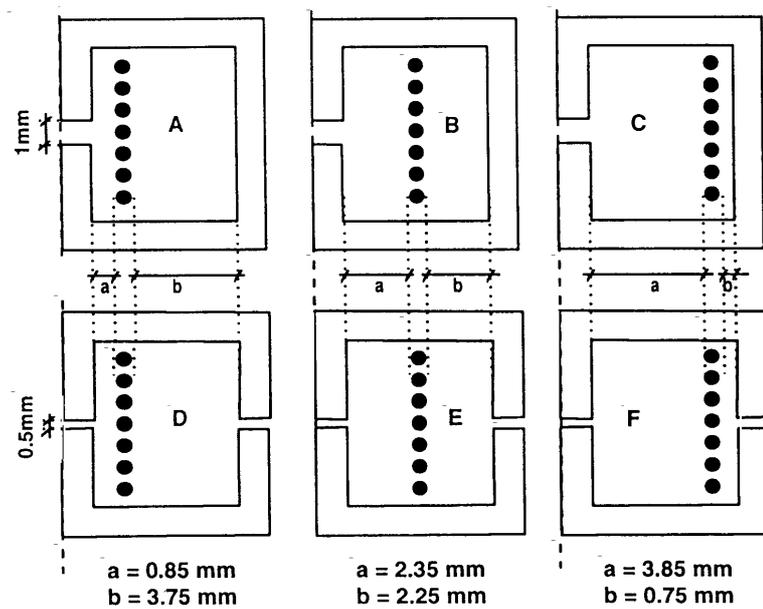


Figure 6. Current distribution in a six layer Flyback transformer.

Air gap in central leg							
Without interleaving			With interleaving			Reduction (%)	
R_1	R_2	$R_1 + R_2$	R_1	R_2	$R_1 + R_2$	Simple method	FEA
18	66	84	30	42	72	14.3	13.6
Air gap in central and outer legs							
Without interleaving			With interleaving			Reduction (%)	
R_1	R_2	$R_1 + R_2$	R_1	R_2	$R_1 + R_2$	Simple method	FEA
22	34	56	18	22	40	28.6	18.5

Influencia del entrehierro:

RM12, conductores de $\phi 1.5$ mm,
Análisis a 150 kHz



ESPESOR ÓPTIMO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS QUE FORMAN EL DEVANADO

Espesor óptimo normalizado $\varphi_{opt}(m)=\text{espesor}/\delta_{SKIN}$

Pérdidas: $P(m)=P_{DC}\cdot F(\varphi_{opt}(m),m)$

Bobinas con entrehierro central

m	$\varphi_{opt}(m)$	$F(\varphi_{opt}(m),m)$
1	1.57	1.44
2	0.961	1.349
3	0.77	1.34
4	0.663	1.337
5	0.591	1.335
6	0.539	1.334
7	0.499	1.334
8	0.466	1.334
9	0.439	1.334
10	0.417	1.334

Bobinas con entrehierro central y exterior

m	$\varphi_{opt}(m)$	$F(\varphi_{opt}(m),m)$
1	3.133	1.437
2	1.57	1.44
3	1.143	1.364
4	0.961	1.349
5	0.849	1.343
6	0.77	1.34
7	0.711	1.338
8	0.663	1.337
9	0.624	1.336
10	0.591	1.335

MÉTODO DE DISEÑO DE BOBINAS:

Datos de partida:

L=450 μ H

Frecuencia=200 kHz

Corriente máxima $I_{MAX}=8.8$ A

Corriente ac $I_{ac}=0.5$ A

Corriente eficaz $I_{RMS}\approx 8.5$ A

Factor de uso de ventana $k_W=0.3$

Saturación $B_S=0.3$ T

Factor de forma geométrico $K_{FG}=85$

Factor de pérdidas en el núcleo

$$K_M = \frac{P_{NU} / Vol}{B_{ac}^2}$$

1.- Selección del núcleo

$$P_{OPT} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{CU} \cdot K_M \cdot K_{FG} \cdot L^2 \cdot I_{ac}^2 \cdot I_{RMS}^2}{K_W \cdot V^{\frac{2}{3}}}}$$

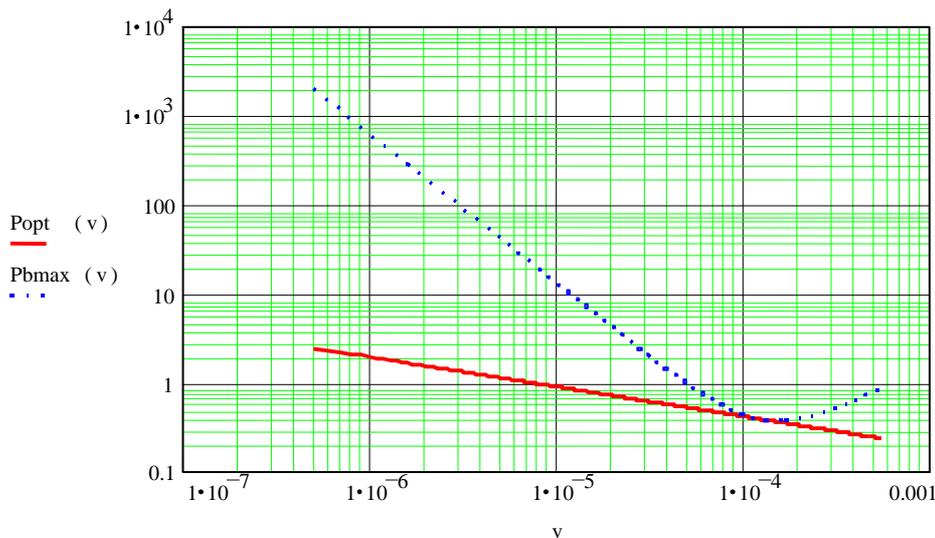
$$P_{Bmax} = K_M \cdot \frac{I_{ac}^2}{I_{MAX}^2} \cdot B_{MAX}^2 \cdot V + \rho_{CU} \cdot \frac{K_{FG}}{K_W} \cdot \left(\frac{L \cdot I_{RMS} \cdot I_{MAX}}{B_{MAX}} \right)^2 \cdot \frac{1}{V^{\frac{5}{3}}}$$

Representación de las pérdidas óptimas totales y las pérdidas a B_{MAX} en función del volumen del núcleo.

El volumen óptimo se encontrará en el cruce de ambas curvas.

Con volúmenes inferiores al óptimo forzosamente acudiremos a un diseño a B_{MAX} para evitar la saturación.

Con volúmenes superiores al óptimo minimizamos pérdidas a costa de incrementar el volumen.



Se asumen como aceptables unas pérdidas del orden de 5W, por lo tanto seleccionamos un volumen de núcleo $\approx 13.000 \text{ mm}^3$. Es decir un *RM14*.

2.- Selección del número de vueltas

a) por límite de pérdidas

$$\frac{dP}{dN} = 0 \quad \Rightarrow \quad N_{OPT} = \left[\frac{K_M \cdot K_W}{\rho_{CU}} \cdot \left(\frac{L \cdot I_{ac}}{I_{RMS}} \right)^2 \cdot \frac{A_W \cdot V}{\bar{l} \cdot A_e} \right]^{\frac{1}{4}}$$

b) por límite de B_{MAX}

$$N = \frac{L \cdot I_{MAX}}{B_{MAX} \cdot A_e}$$

En nuestro caso es la opción b) la seleccionada

$$N=74$$

3.- Diámetro del hilo

$$\phi = \sqrt{\frac{4 \cdot K_w \cdot A_w}{\pi \cdot N}} \approx 0.8 \text{ mm}$$

4.- Determinación del entrehierro

$$g = \frac{\mu_o \cdot A_e \cdot N^2}{L} - \frac{l_e}{\mu_r} = 3 \text{ mm}$$

FICHERO MATHCAD:

DATOS DE ENTRADA:

INDUCTANCIA

$$l := 450 \cdot 10^{-6}$$

FRECUENCIA

$$f := 100000$$

CORRIENTES

$$i_{max} := 8.8$$

$$i_{ac} := 0.8$$

$$i_{rms} := 8.8$$

FACTOR DE USO DE VENTANA

$$k_w := 0.8$$

RESISTIVIDAD CONDUCTOR

$$res := \frac{1}{5.7 \cdot 10^7}$$

PERMEABILIDAD

$$\mu_r := 2000$$

$$b_{max} := 0.8 \text{ B MAXIMO}$$

PERDIDAS NUCLEO

kfg := 85 factor de forma geometrico=80 por lo general

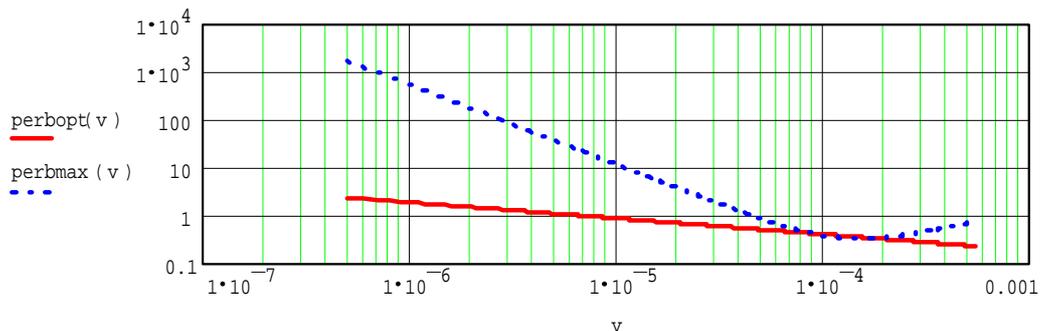
km := $5.28 \cdot 10^6$ factor de pérdidas del núcleo

$$v := 500 \cdot 10^{-9}, (600 \cdot 10^{-9}) \cdot 550000 \cdot 10^{-9}$$

$$perbopt(v) := 2 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{res \cdot km \cdot kfg}{k_w}\right) \cdot l^2 \cdot i_{ac}^2 \cdot i_{rms}^2}{v^3}}$$

$$perbmax(v) := km \cdot \frac{i_{ac}^2}{i_{max}^2} \cdot b_{max}^2 \cdot v + \frac{res \cdot kfg}{k_w} \cdot l^2 \cdot i_{rms}^2 \cdot \frac{i_{max}^2}{b_{max}^2} \cdot \frac{1}{v^3}$$

cálculo a mínimas pérdidas perbopt(v) y a Bmax, perbmax(v). Hay un punto de corte. A la izda de derecho punto el diseño ha de ser a Bmax ya que en el otro caso se satura la bobina. A la derecha del punto el diseño ha de ser a mínimas pérdidas.



EJEMPLO DE DISEÑO

$$\begin{aligned}
 v2 &:= 13 \cdot 10^{-6} & v1 &:= 13 \cdot 10^{-6} \\
 Aw1 &:= 135 \cdot 10^{-6} & Aw2 &:= 135 \cdot 10^{-6} \\
 Ae1 &:= 178 \cdot 10^{-6} & Ae2 &:= 178 \cdot 10^{-6} \\
 lmed1 &:= 90 \cdot 10^{-3} & lmed2 &:= 90 \cdot 10^{-3} \\
 le2 &:= 71 \cdot 10^{-3} & le1 &:= 71 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

$$nlopt := \sqrt[4]{\frac{km \cdot kw}{res} \cdot \frac{iac^2}{irms^2} \cdot Aw1 \cdot \frac{v1}{lmed1 \cdot Ae1^2}}$$

$$nlopt = 14.047$$

$$blmax := \frac{imax \cdot l}{Ae1 \cdot nlopt}$$

$$blmax = 1.584$$

$$blac := \frac{iac \cdot l}{Ae1 \cdot nlopt}$$

$$blac = 0.09$$

$$d1 := \sqrt{\frac{\frac{4}{\pi} \cdot Aw1 \cdot kw}{nlopt}}$$

$$d1 = 0.002$$

$$p1nu := km \cdot v1 \cdot \frac{iac^2}{imax^2} \cdot blmax^2$$

$$p1nu = 0.556$$

$$pdev1 := \frac{res \cdot nlopt \cdot lmed1}{\left(\frac{\pi}{4} \cdot d1^2\right)} \cdot irms^2$$

$$pdev1 = 0.556$$

$$g1 := \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot Ae1 \cdot nlopt^2}{1} - \frac{le1}{ur}$$

$$g1 = 6.258 \cdot 10^{-5}$$

$$nlopt = 14.047$$

$$pdev1 = 0.556$$

$$p1nu = 0.556$$

$$d1 = 0.002$$

$$blmax = 1.584$$

$$n2opt := \frac{l \cdot imax}{bmax \cdot Ae1}$$

$$n2opt = 74.157$$

$$b2max := \frac{imax \cdot l}{Ae2 \cdot n2opt}$$

$$b2max = 0.3$$

$$b2ac := \frac{iac \cdot l}{Ae2 \cdot n2opt}$$

$$b2ac = 0.017$$

$$d2 := \sqrt{\frac{\frac{4}{\pi} \cdot Aw2 \cdot kw}{n2opt}}$$

$$d2 = 8.339 \cdot 10^{-4}$$

$$p2nu := km \cdot v2 \cdot \frac{iac^2}{imax^2} \cdot b2max^2$$

$$p2nu = 0.02$$

$$pdev2 := \frac{res \cdot n2opt \cdot lmed2}{\left(\frac{\pi}{4} \cdot d2^2\right)} \cdot irms^2$$

$$g2 := \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot Ae2 \cdot n2opt^2}{1} - \frac{le2}{ur}$$

$$g2 = 0.003$$

$$n2opt = 74.157$$

$$pdev2 = 15.49$$

$$p2nu = 0.02$$

$$d2 = 8.339 \cdot 10^{-4}$$

$$b2max = 0.3$$