

PARTE DE TESIS DOCTORAL.

# PROYECTO DE CONVERTIDORES FLYBACK .

H. E. TACCA.

Cita:

H. E. TACCA (1998). *PROYECTO DE CONVERTIDORES FLYBACK*. PARTE DE TESIS DOCTORAL.

Dirección estable: <https://www.aacademica.org/hernan.emilio.tacca/5>

ARK: <https://n2t.net/ark:/13683/pQxu/tcU>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons.  
Para ver una copia de esta licencia, visite  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>.

*Acta Académica es un proyecto académico sin fines de lucro enmarcado en la iniciativa de acceso abierto. Acta Académica fue creado para facilitar a investigadores de todo el mundo el compartir su producción académica. Para crear un perfil gratuitamente o acceder a otros trabajos visite: <https://www.aacademica.org>.*

## PROYECTO DE CONVERTIDORES FLYBACK

*Extracto de la tesis doctoral de H. E. Tacca, "Conversión estática de la energía eléctrica: Convertidores asimétricos con doble transferencia directa e indirecta", Universidad de Buenos Aires, marzo de 1998.*

Se obtendrá una ecuación que permitirá estimar a priori y en forma no iterativa, la sección del núcleo necesario para fabricar el inductor acoplado propio de todo convertidor flyback.

La intención es mostrar la forma de obtener una ecuación de dimensionamiento, que luego, mediante procedimientos similares permita efectuar comparaciones volumétricas con los componentes magnéticos de la estructura forward.

En esta materia, proceder en forma analítica conduce a expresiones menos aproximadas que los resultados obtenidos mediante métodos empíricos o iterativos, pero permitirá comparar volúmenes con los requeridos por otras estructuras de conversión.

La ecuación de dimensionamiento resulta de considerar simultáneamente, las exigencias de área de ventana impuestas por el límite de densidad de corriente admisible y las limitaciones de inducción impuestas por el material y la sección del núcleo [2.2] [2.25] [7.12].

El desarrollo se realiza para el caso más general, que es el del funcionamiento flyback en modo continuo, pues el modo discontinuo sería un caso particular (desde el punto de vista magnético) en el cual, la inducción residual es nula. La exposición del método se completa en el *Apéndice 1: Ecuaciones de proyecto para inductores flyback*, y es una generalización del método de proyecto de inductores de alisado expuesto en la referencia 2.2.

Consideraciones adicionales, necesarias para completar el proyecto de los componentes magnéticos, podrán hallarse en las referencias [1.2] [1.4].

### ***Deducción de las ecuaciones de proyecto.***

Expresiones analíticas más exactas podrían obtenerse considerando la dispersión de flujo en el entrehierro [2.1] y la diferencia entre las permeabilidades efectivas relativas estática (o total) y la incremental de gran señal (o reversible) [2.3] pero, ello complicaría las ecuaciones sin llevar, en lo esencial, a conclusiones diferentes.

En la figura 1.1 se muestra el circuito típico de un convertidor flyback, y en la figura 1.2 se dan las formas de onda.

Se define:

$$\Delta I_p = I_{p_{max}} - I_{p_{min}} \quad (1.1)$$

$$\delta i_p = \Delta I_p / I_{p_{max}} \quad (1.2)$$

El valor medio de la corriente primaria  $i_{p(t)}$  resulta:

$$I_{p_{med}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{p(t)} dt = \frac{1}{T} \int_0^{tc} \left( I_{p_{min}} + \Delta I_p \frac{t}{tc} \right) dt = \frac{tc}{T} \left( I_{p_{min}} + \frac{\Delta I_p}{2} \right)$$

y llamando,  $D = tc/T$ , factor de servicio del transistor Tr, se obtiene:

$$I_{p_{med}} = D \left( I_{p_{min}} + \frac{\Delta I_p}{2} \right) \quad (1.3)$$

Utilizando la definición 1.1 :

$$I_{p_{med}} = \frac{D}{2} (I_{p_{max}} + I_{p_{min}}) \quad (1.4)$$

Figura 1.1 : Convertidor flyback básico.

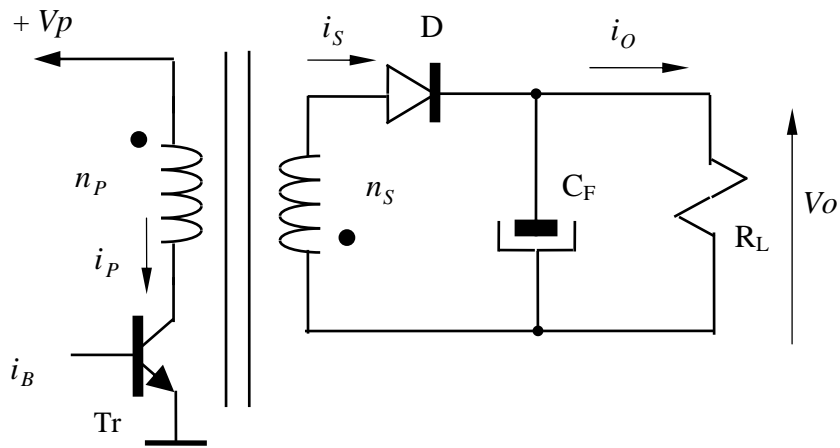
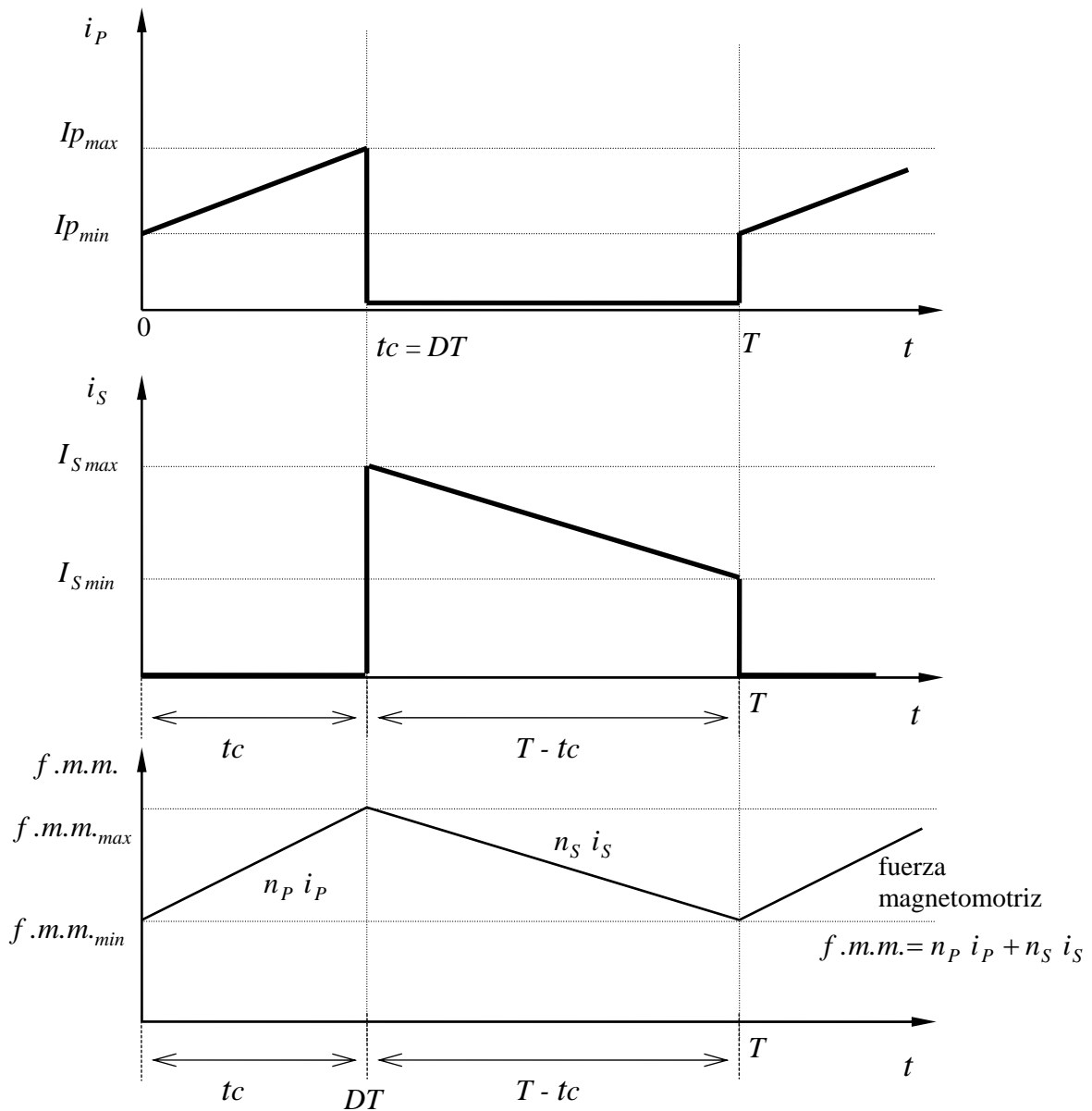


Figura 1.2 : Convertidor flyback. Corrientes primaria y secundaria.



Por otra parte, de la definición 1.1 :

$I_{p_{min}} = I_{p_{max}} - \Delta I_p$  , que sustituida en la ecuación 1.3 da :

$$I_{p_{med}} = D \left( I_{p_{max}} - \frac{\Delta I_p}{2} \right) \quad (1.5)$$

Con la definición 1.2 :

$$I_{p_{med}} = D I_{p_{max}} \left( 1 - \frac{\delta i_p}{2} \right) \quad (1.6)$$

El valor eficaz de la corriente primaria se obtiene de:

$$I_{p_{ef}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [i_p(t)]^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^{tc} \left[ I_{p_{min}} + \Delta I_p \frac{t}{tc} \right]^2 dt = D \left[ I_{p_{min}}^2 + I_{p_{min}} \Delta I_p + \frac{\Delta I_p^2}{3} \right] \quad (1.7)$$

Sustituyendo,  $I_{p_{min}} = I_{p_{max}} - \Delta I_p$  , en la ecuación anterior , se obtiene con la definición 1.2:

$$I_{p_{ef}} = I_{p_{max}} \sqrt{D} \left[ 1 - \delta i_p + \frac{1}{3} \delta i_p^2 \right]^{1/2} \quad (1.8)$$

de donde, el factor de forma de la corriente primaria resulta:

$$f_{f_{I_p}} = \frac{I_{p_{ef}}}{I_{p_{med}}} = \frac{1}{\sqrt{D}} \frac{\sqrt{1 - \delta i_p + \frac{1}{3} \delta i_p^2}}{\left( 1 - \frac{\delta i_p}{2} \right)} \quad (1.9)$$

#### a) POTENCIA PRIMARIA:

Se obtendrá ahora la expresión de la potencia primaria.

La tensión primaria tiene un valor  $V_p = V_{cc}$  , que es constante durante el intervalo  $(0 , tc)$  .

Durante el lapso  $(tc , T)$  la corriente primaria es nula, por lo que la potencia primaria es:

$$P_p = V_p \cdot I_{p_{med}} = D \left( 1 - \frac{\delta i_p}{2} \right) V_p I_{p_{max}} \quad (1.10)$$

#### b) POTENCIA SECUNDARIA:

La potencia secundaria es :  $P_s = \eta P_p$  (1.11)

donde  $\eta$  es el rendimiento del convertidor. Con esta ecuación y la 1.10 se obtiene:

$$P_s = \eta D \left( 1 - \frac{\delta i_p}{2} \right) V_p I_{p_{max}} \quad (1.12)$$

#### c) DIMENSIONAMIENTO DEL NUCLEO:

La sección mínima se obtiene, en aproximación de primera instancia, despreciando las pérdidas en el núcleo.

La densidad de corriente en el primario es:

$\sigma_{Ip} = \frac{Ip_{ef}}{Scu_p}$ , donde  $Scu_p$  es la sección del conductor primario. Por lo tanto:

$$Ip_{ef} = \sigma_{Ip} Scu_p \quad (1.13)$$

Por otra parte:

$$Scu_p = Sv \cdot Fp \cdot Fb / n_p \quad (1.14)$$

donde,

$Fp$  : factor de partición de la ventana ( sección de ventana primaria / sección de ventana total).

$Fb$  : factor de bobinado (sección neta ocupada por el conductor / área de ventana).

$Sv$  : área de ventana.

$n_p$  : cantidad de espiras del primario.

En consecuencia:

$$Ip_{ef} = \frac{\sigma_{Ip}}{n_p} Fp \cdot Fb \cdot Sv \quad (1.15)$$

Por otra parte:

$$Vp = n_p \frac{\Delta B}{tC} S_{Fe} \quad (1.16)$$

donde:

$$\Delta B = B_{max} - B_{min} \quad (1.17)$$

siendo:

$$B_{max} = \frac{\mu_o}{\frac{l_{Fe}}{\mu_{re}} + l_a} n_p Ip_{max} \cong \frac{\mu_o}{l_a} n_p Ip_{max} \quad (1.18.a)$$

pues generalmente es:  $l_a \gg l_{Fe} / \mu_{re}$ , siendo  $\mu_{re}$  la permeabilidad relativa estática.

En forma similar:

$$\Delta B = \frac{\mu_o}{\frac{l_{Fe}}{\mu_{r\Delta}} + l_a} n_p \Delta Ip \cong \frac{\mu_o}{l_a} n_p \Delta Ip \quad (1.18.b)$$

(dado que también se verifica normalmente que:  $l_a \gg l_{Fe} / \mu_{r\Delta}$ , siendo  $\mu_{r\Delta}$  la permeabilidad relativa incremental con gran señal).

Relacionando las expresiones 1.18.a y b resulta:

$$\frac{\Delta B}{B_{max}} = \frac{\Delta I_p}{I_{p_{max}}} = \delta ip \quad (1.19)$$

Sustituyendo este resultado en la ecuación 1.16 se obtiene:

$$V_p = n_p \frac{\delta ip}{tc} B_{max} S_{Fe} = n_p \delta ip B_{max} \frac{f}{D} S_{Fe} \quad (1.20)$$

donde:

$$D = \frac{tc}{T} = tc f$$

Con la ecuación 1.20, la ecuación 1.12 queda:

$$P_s = \eta n_p f \left(1 - \frac{\delta ip}{2}\right) \delta ip B_{max} I_{p_{max}} S_{Fe} \quad (1.21)$$

Igualando las expresiones 1.8 y 1.15 y despejando luego  $I_{p_{max}}$  se tiene:

$$I_{p_{max}} = \frac{\sigma_{Ip}}{n_p} \frac{1}{\sqrt{D}} \frac{F_p F_b S_v}{\sqrt{1 - \delta ip + \frac{1}{3} \delta ip^2}} \quad (1.22)$$

Sustituyendo la ecuación 1.22 en la 1.21 se obtiene:

$$P_s = \eta \frac{f}{\sqrt{D}} \frac{\delta ip \left(1 - \frac{\delta ip}{2}\right)}{\sqrt{1 - \delta ip + \frac{1}{3} \delta ip^2}} \sigma_{Ip} F_p F_b B_{max} S_{Fe} S_v$$

de donde:

$$S_{Fe} S_v = \frac{1}{\delta ip} \frac{\sqrt{1 - \delta ip + \frac{1}{3} \delta ip^2}}{\left(1 - \frac{\delta ip}{2}\right)} \frac{\sqrt{D} P_s}{\eta f \sigma_{Ip} B_{max} F_p F_b} \quad (1.23)$$

Utilizando el factor de ventana:  $F_v = S_v / S_{Fe}$ , la ecuación 1.23 queda :

$$S_{Fe} = \frac{1}{\sqrt{\delta ip}} \sqrt{\frac{1 - \delta ip + \frac{1}{3} \delta ip^2}{\left(1 - \frac{\delta ip}{2}\right)}} \sqrt{\frac{\sqrt{D} P_s}{\eta B_{max} f \sigma_{Ip} F_p F_b F_v}} \quad (1.24)$$

Llamando :

$$G(\delta ip) = \sqrt{\frac{\sqrt{1 - \delta ip + \frac{1}{3} \delta ip^2}}{\left(1 - \frac{\delta ip}{2}\right)}}$$

se puede verificar que para :

$$0 \leq \delta ip \leq 1 \Rightarrow G(\delta ip) \cong 1$$

Por lo tanto:

$$S_{Fe} = \sqrt{\frac{\sqrt{D} Ps}{\eta \delta ip B_{max} f \sigma_{Ip} Fp Fb Fv}} \quad (1.25)$$

d) CALCULO DEL ENTREHIERRO:

Según la ley de Ampère, la ecuación de la f.m.m. es:

$$\frac{B}{\mu_o} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{re}} + l_a \right) = NI$$

Por lo tanto:

$$\frac{B_{max}}{\mu_o} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{re}} + l_a \right) = n_P I_{p_{max}} \quad (1.26)$$

donde  $\mu_{re}$  es la permeabilidad relativa estática.

De la ecuación 1.26 puede despejarse:

$$n_P = \frac{B_{max}}{I_{p_{max}} \mu_o} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{re}} + l_a \right) \quad (1.27)$$

Por otra parte, la inductancia primaria es:

$$L_{p_e} = \frac{n_P \Phi_{p_{max}}}{I_{p_{max}}} = \frac{\mu_o}{\left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{re}} + l_a \right)} S_{Fe} n_P^2 \quad (1.28)$$

donde  $L_{p_e}$  es la inductancia primaria estática.

De la misma forma, la inductancia incremental sería:

$$L_{p_{\Delta}} = \frac{\mu_o}{\left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{r\Delta}} + l_a \right)} S_{Fe} n_P^2 \quad (1.29)$$

Si el material magnético es lineal:  $\mu_{re} = \mu_{r\Delta} \Rightarrow Lp_e = Lp_\Delta$

Se define la permeabilidad relativa efectiva estática tal que:

$$Lp_e = \mu_o \mu_{re_{ef}} \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} n_p^2 \Rightarrow \mu_{re_{ef}} = \frac{l_{Fe}}{\left(\frac{l_{Fe}}{\mu_{re}} + l_a\right)} = \frac{\mu_{re}}{\left(1 + \mu_{re} \frac{l_a}{l_{Fe}}\right)} \quad (1.30)$$

y de manera similar se define la permeabilidad relativa efectiva incremental:

$$\mu_{r\Delta_{ef}} = \frac{\mu_{r\Delta}}{\left(1 + \mu_{r\Delta} \frac{l_a}{l_{Fe}}\right)} \quad (1.31)$$

Normalmente resulta:  $\mu_{re} \frac{l_a}{l_{Fe}} > \mu_{r\Delta} \frac{l_a}{l_{Fe}} \gg 1$ , por lo que:

$$\mu_{r\Delta_{ef}} = \mu_{re_{ef}} \cong \frac{l_{Fe}}{l_a} \quad (1.32)$$

y en consecuencia:  $\frac{\mu_{r\Delta_{ef}}}{\mu_{re_{ef}}} \cong 1$

De las curvas para  $\mu_{r\Delta_{ef}}$  (y también para  $\mu_{re_{ef}}$ ) puede notarse que cuando  $B_{max}$  aumenta,  $\mu_{r\Delta_{ef}}$  disminuye a partir del valor en que ya no se verifica  $\mu_{r\Delta} \frac{l_a}{l_{Fe}} \gg 1$  [ver referencia 2.3].

Por lo tanto:

$$\mu_{r\Delta_{ef}} \Big|_{max} = \frac{l_{Fe}}{l_a} \quad (1.33)$$

Sustituyendo la expresión 1.33 en la ecuación 1.31:

$$\mu_{r\Delta_{ef}} = \mu_{r\Delta_{ef}} \Big|_{max} \frac{1}{\left(1 + \frac{\mu_{r\Delta_{ef}} \Big|_{max}}{\mu_{r\Delta}}\right)} \quad (1.34)$$

y una expresión similar puede obtenerse para las permeabilidades estáticas.

Se denominará:

$$\gamma_\Delta = \frac{1}{\left(1 + \frac{\mu_{r\Delta_{ef}} \Big|_{max}}{\mu_{r\Delta}}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{l_{Fe}}{\mu_{r\Delta} l_a}\right)} \quad (1.35)$$

y en forma similar, puede definirse  $\gamma_e$ :



$$\gamma_e = \frac{1}{\left(1 + \frac{l_{Fe}}{\mu_{re} l_a}\right)} \quad (1.36)$$

y generalmente resulta  $\gamma_e > \gamma_\Delta$ .

En la mayoría de los casos prácticos:  $\gamma_e \cong 0,95$  y  $\gamma_\Delta \cong 0,85$  (en la vecindad de la saturación).

En la región lineal, cuando no hay saturación incipiente:

$$\gamma_e = \gamma_\Delta = 1$$

Con la definición 1.36, las ecuaciones 1.27 y 1.28 quedan:

$$n_P = \frac{B_{max}}{I_{p_{max}}} \frac{l_a}{\mu_o} \frac{1}{\gamma_e} \quad (1.37)$$

$$Lp_e = \frac{\mu_o}{l_a} \gamma_e S_{Fe} n_P^2 \quad (1.38)$$

Sustituyendo la ecuación 1.37 en la 1.38 :

$$Lp_e = \left(\frac{B_{max}}{I_{p_{max}}}\right)^2 \frac{l_a}{\mu_o} \frac{1}{\gamma_e} S_{Fe} \quad (1.39)$$

de donde se despeja:

$$l_a = \gamma_e \frac{\mu_o Lp_e}{S_{Fe}} \left(\frac{I_{p_{max}}}{B_{max}}\right)^2 \quad (1.40)$$

y una vez adoptado el entrehierro, con la ecuación 1.37 puede determinarse el número de espiras necesario (Ver *Apéndice 1: Ecuaciones de proyecto para inductores flyback*).

En los convertidores con alta frecuencia de conmutación,  $B_{max}$  está impuesto por las pérdidas en el núcleo y no por la saturación, en consecuencia, se trabaja en la región lineal de la curva  $B-H$  y resulta:  $Lp_e \cong Lp_\Delta$  (siempre que se utilice entrehierro).

**NOTA:**

Se abreviará  $B_{max}$  simplemente como  $B_m$  y se denominará  $B_{m_{max}}$  al máximo valor de  $B_m$  alcanzado.

### APENDICE 1 : Ecuaciones de proyecto para inductores flyback.

De la ecuación 1.25 se tiene, para la densidad de corriente expresada en A/mm<sup>2</sup> y la sección del núcleo en cm<sup>2</sup> :

$$S_{Fe} [cm^2] = 10 \sqrt{\frac{\sqrt{D} P_s [W]}{\eta \delta i_p F_p F_b F_v \sigma_{I_p} [A/mm^2] B_m [T] f [Hz]}} \quad (A1.1)$$

donde :

$S_{Fe}$  : sección mínima necesaria para el núcleo.

$D$  : factor de servicio del transistor.

$\eta$  : rendimiento del convertidor.

$\delta i_p$  : variación relativa de la corriente primaria.

$F_p$  : factor de partición de ventana del primario ( $S_{vp}/S_v$ ).

$F_b$  : factor de llenado de la ventana.

$F_v$  : factor de ventana (cociente entre el área de ventana y la sección del núcleo).

$P_s$  : potencia de salida.

$\sigma_{I_p}$  : densidad de corriente primaria.

$B_m$  : inducción máxima.

$f$  : frecuencia de conmutación.

Una vez elegido el núcleo, con la ecuación 1.40 , adoptando  $\gamma_e = 0,94$  y expresando la sección en cm<sup>2</sup> y el entrehierro en mm , se tiene :

$$l_a [mm] = 12 \frac{L_p [H]}{S_{Fe} [cm^2]} \left( \frac{I_{p_{max}} [A]}{B_m [T]} \right)^2 \quad (A1.2)$$

donde  $L_p$  es la inductancia referida al primario expresada en H .

Si es preciso colocar un separador, para introducir un entrehierro, éste se dimensionará con :

$$e_{[mm]} = \frac{l_a [mm]}{2} \quad (A1.3)$$

Una vez adoptado el entrehierro, se calcula el número de espiras mediante la ecuación 1.37 , que, con  $\gamma_e = 0,94$  y expresando el entrehierro en mm , resulta :

$$n_p = 850 l_a [mm] \frac{B_m [T]}{I_{p_{max}} [A]} \quad (A1.4)$$

También debe verificarse que :

$$l_a \gg \frac{l_{Fe}}{\mu_{r\Delta}} \geq \frac{l_{Fe}}{\mu_{re}} \quad (A1.5)$$

donde es,

$\mu_{r\Delta}$  : permeabilidad relativa incremental de gran señal, para el valor medio de polarización del campo magnético en el punto de operación de máxima potencia de salida.

$\mu_{re}$  : permeabilidad normal o estática para el punto de máxima inducción (  $B = B_{m_{max}}$  ).

Con esto, puede calcularse  $\gamma_e$  a partir de la ecuación 1.36 y si fuera necesario, se puede corregir los cálculos hechos previamente con  $\gamma_e = 0,94$  . Como este método de proyecto es aproximado, no se justificará efectuar cálculos iterativos si resulta :  $0,85 \leq \gamma_e \leq 1$  .

Finalmente, debe calcularse la sección de los conductores. Para el primario :

$$Scu_P [mm^2] = Fp Fb \frac{Sv [mm^2]}{n_p} \quad (A1.6)$$

y se adoptará un alambre normalizado que tenga una sección igual o mayor que la calculada. Luego, se verificará que el diámetro del alambre elegido no supere en más de dos veces la profundidad de penetración del campo electromagnético en el material conductor, para la frecuencia de conmutación adoptada.

Si el diámetro adoptado fuese mayor que el doble de la profundidad de penetración, deberá utilizarse un conductor multifilar o bien bobinar con cinta.

En forma similar, la sección del conductor secundario será :

$$Scu_S [mm^2] = (1 - Fp) Fb \frac{Sv [mm^2]}{n_s} \quad (A1.7)$$

donde,  $n_s$  es el número de espiras secundarias, que para el caso habitual de conducción continua está dado por :

$$n_s = n_p \left( \frac{Vs}{Vp_{min}} \right) \left( \frac{1}{D_{max}} - 1 \right) \quad (A1.8)$$

donde,

$Vs$  : tensión de salida del convertidor.

$Vp_{min}$  : tensión primaria mínima a convertir.

$D_{max}$  : máximo factor de servicio posible.