

Trasformatori di alimentazione monofasi di piccola potenza

Il progetto completo teorico dei trasformatori in generale è oltremodo complesso. Deve tenere conto di un numero elevato di parametri, alcuni dei quali possono variare entro limiti piuttosto ampi, secondo l'uso a cui sono destinati, complicando ulteriormente i calcoli. Tutto ciò è valido e conveniente soltanto nel caso di progettazione di trasformatori di grande e grandissima potenza, giustificato dal costo e dai pericoli legati alle alte e altissime tensioni in gioco.

I trasformatori possono essere di più tipi: a nuclei, detti anche "a colonne", o a mantello, detti anche "corazzati". Il tipo a colonne, per piccoli trasformatori, si va praticamente abbandonando, perciò considereremo quasi esclusivamente il tipo a mantello, anche se le formule sono abbastanza simili in entrambi i casi. Negli ultimi anni si vanno diffondendo sempre più spesso trasformatori con nucleo toroidale, ma in caso di auto-costruzione sono difficoltosi da avvolgere.

Fortunatamente per i piccoli trasformatori (sotto i 5 kVA) molti fattori sono stabiliti a priori, frutto ormai di molta pratica e lunga sperimentazione.

I lamierini che ne compongono il nucleo, per i tipi normalmente in commercio, sono di spessore 0,5 o 0,35 mm. Raramente e per usi particolari possono trovarsi con spessori più sottili. Sono di forma "E-I" per trasformatori a mantello con dimensioni stabilite e unificate a norme UNEL (vedi tabella 1) oppure DILDA (vedi tabella 2). Sono di forma "C-I" per trasformatori a colonne, con dimensioni fisiche praticamente uguali ai lamierini "E-I" tagliati nel mezzo. Vengono tranciati dal nastro continuo in lamiera di ferro al silicio, pertanto conservano gli stessi rapporti tra le dimensioni, qualsiasi misura abbiano (vedi figure 1 e 2). Questo soprattutto per evitare sfridi e sprechi di materiale e facilitare al massimo il dimensionamento del nucleo, il calcolo ed il montaggio. Sono forati agli angoli o al centro del lato più lungo per facilitarne il serraggio. Allo scopo si trovano in commercio per i nuclei a mantello serrapacchi e calotte di protezione con misure a norme. Per tutti i tipi si trovano cartocci in plastica stampata per gli avvolgimenti, con misure a norme e spessori appropriati per qualsiasi potenza. I nuclei per trasformatori toroidali invece vengono ricavati avvolgendo nastro di lamierino magnetico di adeguata larghezza per uno spessore tale da ricavare la sezione necessaria.

Figura 1

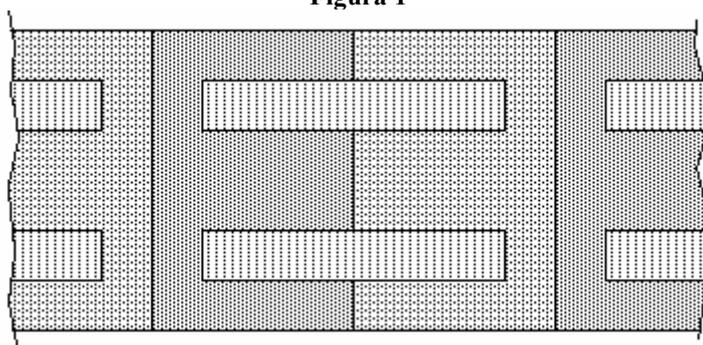


Tabella 1

Dimensioni e dati risultanti di alcuni lamierini a norme UNEL								
Nelle tabelle UNEL tutte le quote del lamierino stanno in stretto rapporto alla quota C, per cui con tale misura si possono calcolare tutte le altre quote.								
Dimensioni in mm	C	A	B	D	P	L	λ	λ
$C \cong \sqrt{Sn}$	12	24	6	18	30	36	72	72
$A = C \times 2 = D + B$	14	28	7	21	35	42	84	84
$B = G = F = C / 2$	16	32	8	24	40	48	96	96
$D = A - B = 3 \times B = 1,5 \times C$	18	36	9	27	45	54	108	108
	20	40	10	30	50	60	120	120
$P = A + B$	22	44	11	33	55	66	132	132
$L = C + 4 \times B = A + B$	25	50	12,5	37,5	62,5	75	150	150
	28	56	14	42	70	84	168	168
	32	64	16	48	80	96	192	192
$\lambda = 2 \times D + 6 \times B = 6 \times C$	36	72	18	54	90	108	216	216
lung. media del circuito magnetico, equiv. anche a:	40	80	20	60	100	120	240	240
	45	90	22,5	67,5	112,5	135	270	270
$\lambda = 6 \times \sqrt{Sn}$ con sez. nucleo quadrata.	50	100	25	75	125	150	300	300
	60	120	30	90	150	180	360	360
$\lambda \cong 4 \times C + 4 \times B = 6 \times C$	70	140	35	105	175	210	420	420
(lung. media delle spire con sez. nucleo quadrata)	80	160	40	120	200	240	480	480
	90	180	45	135	225	270	540	540

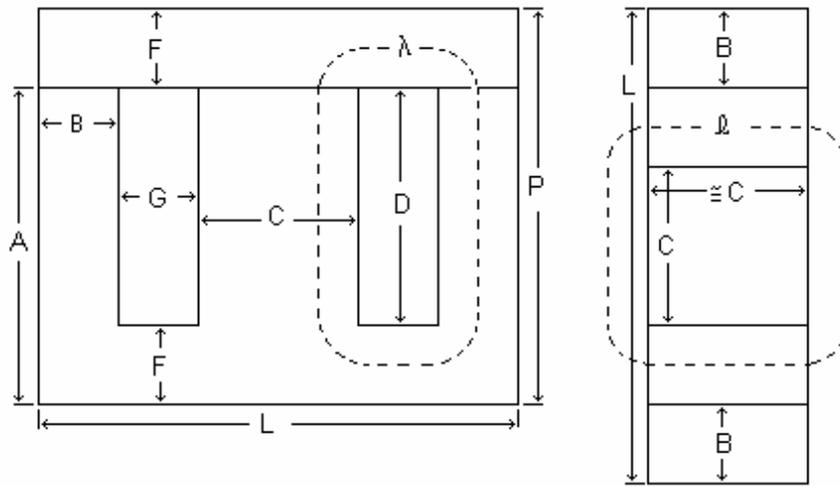


Figura 2

Tabella 2

Dimensioni e dati risultanti di alcuni lamierini a norme DILDA								
Nelle tabelle DILDA tutte le quote del lamierino stanno in stretto rapporto alle quote della finestra (D - G) per cui con queste due misure si possono calcolare tutte le altre quote								
Dimensioni in mm	C	D	G	B	P	L	λ	λ
$C = (2 \times D) - (4 \times G)$	10	17	6	6	29	34	70	64
$\cong \sqrt{Sn}$	13	22,5	8	8	38,5	45	93	84
$P = D + (2 \times G)$	17	28,5	10	10	48,5	57	117	108
$L = 2 \times D$	22	37	13	13	63	74	152	140
$B = F = G$	28	48	17	17	82	96	198	180
$\lambda \cong 4 \times C + 4 \times G$	36	62	22	22	106	124	256	232
$\lambda = 2 \times D + 2 \times G + 4 \times F$	46	77	27	27	131	154	316	292

Costituzione del trasformatore

Il trasformatore è costituito essenzialmente da due o più avvolgimenti isolati, ma strettamente concatenati tra loro per mezzo di un nucleo ferromagnetico. Se il primo degli avvolgimenti, detto Primario, viene alimentato dalla rete a corrente alternata con una tensione sinusoidale "V", produce nel nucleo un flusso magnetico alternato sinusoidale di valore efficace " ϕ_{eff} ". Per effetto dell'Autoinduzione si genera nello stesso primario una Forza Contro Elettromotrice "E" praticamente uguale e contraria alla tensione "V" applicata in ingresso, che lascia circolare, ad equilibrio avvenuto, soltanto una minima Corrente di magnetizzazione, di valore compreso tra l' 1 e il 5% circa della corrente a pieno carico. Per "N" spire vale:

$$E = \phi_{eff} \times N \times \omega$$

Dove N = Numero di spire avvolte per il primario.

ω = Pulsazione elettromagnetica che vale:

$$\omega = 2 \times \pi \times f$$

in cui " f " è la frequenza della rete di alimentazione, mentre:

$$\phi_{eff} = B_{eff} \times Sn$$

in cui B_{eff} è l'induzione elettromagnetica in We/m² (Weber su metroquadrato) e Sn la sezione netta del nucleo magnetico in m². Perciò si può scrivere:

$$E = V = 2 \times \pi \times f \times N \times B_{eff} \times Sn$$

Ma nel calcolo del trasformatore, per evitare effetti di saturazione del nucleo, va considerato il valore massimo dell'induzione, e non quello efficace. Essendo:

$$B_{eff} = \frac{B}{\sqrt{2}}$$

Risulta:

$$V = \frac{2 \times \pi}{\sqrt{2}} \times f \times N \times B \times Sn = \frac{2 \times 3,14}{1,41} \times f \times N \times B \times Sn$$

Ed infine semplificando:

$$V = 4,44 \times f \times N \times B \times Sn$$

Dove: f = Hetz, N = Numero di spire, B = We/m², Sn = m²
 (Più precisamente sarebbe 4,4428829, ma due cifre decimali sono sufficienti).
 Inversamente, per avere "N" si calcola:

$$N = \frac{V}{4,44 \times f \times B \times Sn}$$

Formula definitiva estesa per il calcolo del numero di spire.

Dovendosi calcolare la sezione del nucleo di piccoli trasformatore è molto più conveniente l'impiego dei cm² che dei m². Per evitare l'uso di molti decimali e le difficoltà di calcolo che ne derivano, si riscrive:

$$N = \frac{V \times 10^4}{4,44 \times f \times B \times Sn}$$

L'induzione magnetica "B" può assumere un valore variabile tra 0,8 e 1,6 We/m². Impiegando il valore più basso si ottengono trasformatore con maggior numero di spire, ma maggiore impedenza del primario a vuoto e perciò più bassa corrente di magnetizzazione, minori perdite nel ferro e minor riscaldamento del nucleo. Adatti a rimanere inseriti costantemente sulla rete. Presentano però una maggiore resistenza ohmica interna e un maggior riscaldamento a pieno carico. Viceversa impiegando il valore più alto si ottengono trasformatore con minor numero di spire, più alta corrente di magnetizzazione e maggior riscaldamento a vuoto, ma una minore resistenza interna e un minor riscaldamento a pieno carico. Adatti per forti spunti di corrente. Maggiori o minori valori di "B" complicano inutilmente i calcoli, in quanto comportano forti variazioni della permeabilità relativa " μ_r ". Il valore generalmente adottato, anche nel caso che si abbiano lamierini di cui non si sanno le caratteristiche specifiche, per calcolare normalmente i piccoli trasformatore è di 1 We/m².

In questo caso la formula precedente, per reti a 50 Hz si modifica così:

$$N = \frac{10^4 \times V}{4,44 \times 50 \times 1 \times Sn} = \frac{10000 \times V}{222 \times Sn} = \frac{45 \times V}{Sn}$$

Formula semplificata perfettamente valida, ma soltanto per reti a 50 Hz e induzione "B" pari ad 1 We/m². Generalmente impiegata per velocizzare i calcoli.

Il rendimento varia secondo la potenza impegnata: tanto più grande è il trasformatore tanto maggiore è il rendimento, e inversamente tanto più è piccolo e tanto minore la potenza percentuale resa (vedi tabella 3). Nei grandi e grandissimi trasformatore si arriva a rendimenti prossimi all'unità.

Nel caso che un trasformatore funzioni a vuoto, ossia con secondario aperto, a causa della stretta concatenazione tra gli avvolgimenti, viene indotta sul secondario (nel caso più semplice di secondario singolo) una tensione alternata sinusoidale perfettamente proporzionale al numero di spire avvolte, ma di verso contrario al senso della tensione primaria, secondo la relazione:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Dove: V_1 = Tensione primaria,
 V_2 = Tensione secondaria,
 N_1 = Numero di spire avvolte per il primario,
 N_2 = Numero di spire avvolte per il secondario.

Nel caso in cui il secondario venga chiuso su di un carico, circola una corrente proporzionale all'impedenza del carico, ma di verso opposto alla corrente che scorre nel primario. Si produce così un flusso magnetico in opposizione di fase a quello generato dal primario, che induce nello stesso una ulteriore Forza Contro Elettromotrice che va a sommarsi a quella di autoinduzione. Per potersi mantenere la corrente di magnetizzazione viene assorbita dalla rete una corrente superiore, fino a ristabilire nel nucleo l'intensità del flusso magnetico originale.

Da questo si capisce che: A vuoto o in ogni altra condizione di carico il flusso magnetico che attraversa il nucleo si mantiene costante, ed è stabilito a priori al momento della costruzione.

Se il trasformatore si brucia per sovraccarico, Dipende esclusivamente dalla produzione di calore dovuta alla resistenza ohmica degli avvolgimenti.

Da questo punto di vista emerge che: Il trasformatore è una macchina perfettamente autoregolante, che assorbe in ingresso tanta potenza quanta ne eroga in uscita, maggiorata soltanto dalla potenza assorbita a vuoto e delle perdite percentuali.

La corrente a vuoto aumenta con l'aumentare dei giunti magnetici (traferri) e, a parità di sezione del nucleo, con l'aumento della lunghezza del circuito magnetico.

I traferri si possono evitare montando i lamierini in modo intercalato, ossia rovesciando le "E" e le "I" ad ogni strato, in modo che il giunto magnetico rimanga tra due lamiere piane, e serrando bene i lamierini a montaggio finito. La lunghezza del circuito magnetico si contiene realizzando il pacco con lamierini dimensionati in modo che la larghezza "C" del nucleo centrale sia più o meno uguale allo spessore del pacco compresso, ossia mantenendo il nucleo il più quadrato possibile, in modo che la proporzione tra la lunghezza del circuito magnetico e la sezione sia simile per qualsiasi dimensione. Dove non ci siano esigenze di isolamento particolari e perciò risparmio nella superficie della finestra, si può mantenere il pacco più spesso della larghezza del nucleo, con diminuzione del numero delle spire e del peso del rame (più costoso) e con diminuzione della lunghezza del nucleo e conseguente minore corrente a vuoto, ma non conviene superare le $1,5 \div 2$ volte della misura "C" pena l'eccessivo aumento della lunghezza media della spira, perciò dell'avvolgimento e della sua resistenza ohmica con conseguente aumento delle perdite nel rame e del surriscaldamento a carico.

Il $\cos\phi$ del trasformatore è fortemente influenzato dal fattore di potenza dell'utilizzatore connesso al secondario, tanto che è comunque molto alto in caso di carichi puramente resistivi e a pieno regime, mentre nel caso che alimenti un motore elettrico finisce per assumerne il $\cos\phi$ a seconda del carico.

Trattandosi di piccoli trasformatori con raffreddamento in aria naturale è superflua la lunga trattazione riguardante il calcolo delle sovratemperature nei vari strati dell'avvolgimento o lo smaltimento del calore per canalizzazione del nucleo.

Basti sapere che le perdite totali nel trasformatore (tradotte in calore) sono la somma delle perdite nel rame e di quelle nel ferro. Le prime riconducibili, nei piccoli trasformatori a frequenza di rete, praticamente alla sola resistenza ohmica degli avvolgimenti, in quanto "l'effetto pelle" a frequenza così bassa si manifesta in modo debolissimo, a meno di conduttori con sezione di diversi cm^2 , nel qual caso si usano piattine o avvolgimenti a conduttori multipli. Mentre le seconde sono la somma delle perdite per correnti parassite, ragione per cui il nucleo è costituito da lamierini il più sottili possibile e isolati tra loro, più le perdite per isteresi, dovute al fatto che i valori istantanei dell'induzione seguono con un certo ritardo (isteresi) i valori del campo magnetico. Le perdite per isteresi aumentano in proporzione con la frequenza e con il quadrato dell'induzione magnetica.

Perdite ulteriori si hanno per dispersione del flusso magnetico, molto difficilmente quantizzabili, ma possono evitarsi discretamente sovrapponendo correttamente gli avvolgimenti e dimensionando il diametro dei conduttori in modo da riempire completamente la finestra del nucleo. Nei trasformatori a mantello tutti gli avvolgimenti sono realizzati sovrapposti sul nucleo centrale, circondati dal giogo, e pertanto non presentano particolari difficoltà. Nei trasformatori a colonne sia il primario che i secondari debbono essere suddivisi in due metà uguali da avvolgere sovrapposti su ciascuna colonna, badando bene al verso degli avvolgimenti e alla loro connessione. In entrambi i casi bisogna avere cura che l'avvolgimento riempia completamente la finestra del nucleo. Nei trasformatori toroidali gli avvolgimenti vanno distribuiti equamente su tutto il perimetro dell'anello, accuratamente sovrapposti. In questo caso non vi sono praticamente dispersioni di flusso.

Proprio a causa delle perdite, il rendimento (η) cala con il diminuire delle potenze impegnate: la sezione del nucleo è funzione della radice quadrata della potenza, pertanto con potenze più basse il peso del ferro è percentualmente maggiore, mentre con nuclei sempre più piccoli si hanno numeri di spire maggiori e fili sempre più sottili, con conseguente aumento della resistenza ohmica.

Tabella 3

Rendimento medio secondo la potenza impegnata							
Potenza secondaria in voltampere				Perdite percentuali Watt		Rendimento percentuale η	
Da	3	a	10	40%	30%	0,60	0,70
"	10	a	40	30%	20%	0,70	0,80
"	40	a	60	20%	15%	0,80	0,85
"	60	a	100	15%	12%	0,85	0,88
"	100	a	200	12%	10%	0,88	0,90
"	200	a	500	10%	8%	0,90	0,92
"	500	a	1000	8%	7%	0,92	0,93
"	1000	a	2000	7%	6%	0,93	0,94
"	2000	a	3000	6%	5%	0,94	0,95
"	3000	a	4000	5%	4%	0,95	0,96
"	4000	a	5000	4%	3%	0,96	0,97

Dovendosi isolare i lamierini tra loro, lo spessore del pacco risulta essere la somma degli spessori dei lamierini più quella degli isolanti. La differenza tra lo spessore teorico e quello effettivo si chiama Fattore di stipamento (Kfe). In passato si usava come isolante della speciale carta sottilissima, oppure della vernice. Attualmente si ricorre all'ossidazione delle facce dei lamierini, con notevole risparmio di spazio.

Kfe vale:

Per spessore 0.5 mm	1,08 con carta	1,06 con vernice o ossido
Per spessore 0,35 mm	1,11 con carta	1,09 con vernice o ossido

Dimensionamento del trasformatore

I parametri più importanti di cui tener conto per dimensionare un trasformatore sono: la potenza secondaria resa " P_2 " in VA (voltampere), il rendimento " η ", la tensione primaria " V_1 " e la tensione secondaria " V_2 " (o le tensioni secondarie se le uscite sono più di una).

Per prima cosa si deve stabilire quanta potenza deve erogare il trasformatore al secondario, o ai secondari e farne la somma se sono più di uno. Poi dimensionare la sezione netta del nucleo. Si calcola con la formula seguente, che dà la superficie direttamente in centimetri quadrati:

$$S_n = K_s \times \sqrt{P_2}$$

Dove P_2 è la somma totale delle potenze ai secondari in voltampere e "Ks" è un coefficiente variabile tra 1,2 e 1,5 che consente di stabilire una maggiore economia del rame o del ferro. Ks basso equivale ad una maggior economia nel ferro, viceversa Ks alto significa maggior risparmio nel rame. Per un buon compromesso in un trasformatore per servizio continuo si assume $K_s = 1,35$.

Per scegliere le dimensioni dei lamierini da impiegare basta fare la radice quadrata della sezione netta per trovare la misura della colonna centrale "C" e scegliere poi il tipo di lamierino standard con la misura che più si avvicina, infine moltiplicare per il coefficiente Kfe per avere lo spessore del pacco.

Naturalmente dovendo riutilizzare un nucleo usato si ricaverà la superficie netta misurando la larghezza di "C" e lo spessore di un singolo lamierino, e moltiplicando per il numero dei lamierini a disposizione, poi si userà la formula inversa per sapere quanta potenza se ne potrà ricavare:

$$P_2 = \left(\frac{S_n}{K_s} \right)^2$$

Trovata la sezione netta del nucleo si calcola il numero delle spire del primario:

$$N = \frac{V \times 10^4}{4,44 \times f \times B \times S_n} \quad \text{Oppure:} \quad N = \frac{45 \times V}{S_n}$$

Con lo stesso metodo si ricava il numero delle spire del secondario, o dei secondari in caso di secondari multipli, maggiorandolo del 5% circa per compensare le perdite e le cadute di tensione. Precisamente questa percentuale dovrebbe essere maggiore per piccolissimi trasformatori, e decrescere velocemente al crescere della potenza, anche se influiscono prevalentemente le proporzioni fisiche tra le dimensioni della finestra, la larghezza "C" del nucleo e la sua lunghezza. Per lamierini a norme CEI e per potenze di uso hobbistico si aggira intorno alla percentuale suddetta, per cui basta moltiplicare il risultato della formula impiegata per 1,05.

Di seguito si debbono calcolare le sezioni dei conduttori ed infine l'ingombro totale dell'avvolgimento, per verificare che entri nella finestra del lamierino prescelto.

Per evitare surriscaldamenti a carico ed eccessiva caduta ohmica di tensione si assume una densità di corrente " σ " da 2 a 2,5 A/mm², generalmente 2,2 A/mm². Densità di corrente maggiori si assumono soltanto nel caso di avvolgimenti in cui la corrente circoli per un solo semiperiodo, come nel caso di secondario con presa centrale per un raddrizzatore a due semionde. Nel caso del primario bisogna ricordare che la corrente che vi transita è maggiore, in quanto il trasformatore assorbe dalla rete anche la percentuale di potenza relativa alle perdite, secondo la potenza impegnata e come specificato dalla **tabella 3**. Pertanto si scrive:

$$I_1 = \frac{P_2}{V_1 \times \eta}$$

Per calcolare la sezione netta "Sr" in mm² del filo smaltato da avvolgere, sapendo la corrente "I" in ampere che vi scorre, si scrive:

$$S_r = \frac{I}{\sigma}$$

Il diametro del filo nudo si ricava dalla formula del diametro del cerchio:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times Sr}{\pi}}$$

Per cui sostituendo "Sr" con la formula relativa si ha:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times I}{\pi \times \sigma}} \quad \text{che equivale a:} \quad \sqrt{\frac{4}{\pi \times \sigma}} \times \sqrt{I}$$

Assegnando i relativi valori numerici e semplificando risulta:

$$\text{Per } \sigma = 2 \text{ A/mm}^2 \quad d \cong 0,8 \times \sqrt{I}$$

$$\text{Per } \sigma = 2,2 \text{ A/mm}^2 \quad d \cong 0,6 \times \sqrt{I}$$

$$\text{Per } \sigma = 2,5 \text{ A/mm}^2 \quad d \cong 0,5 \times \sqrt{I}$$

In teoria un conduttore di sezione circolare occupa in un avvolgimento una superficie pari al suo diametro al quadrato. In pratica invece si dovrà tener conto anche dell'ingombro della vernice isolante, ossia del suo diametro lordo, più eventuali imperfezioni o eventuali scostamenti dai conduttori adiacenti, specialmente nel caso di avvolgimento manuale. Nella tabella a fine capitolo, relativa alle caratteristiche dei conduttori per avvolgimenti, viene specificato quante spire per cm² si possono avvolgere secondo il diametro del conduttore, per cui sapendo di quante spire e di quale diametro sono composti il primario e i secondari, si può risalire all'ingombro netto degli avvolgimenti nella finestra.

Ma nella finestra del lamierino prescelto l'ingombro effettivo è determinato anche dallo spessore del cartoccio isolante sul quale si realizza l'avvolgimento, più lo spessore del cartoncino isolante tra il primario e il secondario, più lo spessore di eventuali fogli di carta isolante tra uno strato e l'altro, specialmente nei trasformatori a tensioni elevate. Perciò l'ingombro netto va moltiplicato per un coefficiente "Ki" variabile da 1,4 nel caso di trasformatori di potenza maggiore (meno conduttori e più grossi, meno strati, secondario singolo), a 3 nel caso di trasformatori piccoli (molti conduttori sottili, molti strati bene isolati, secondari multipli, oppure avvolgimenti avvolti alla rinfusa a mano).

Per queste ragioni il coefficiente "Ki" secondo la potenza varia:

Da 10 a 100 W	3 - 2,1
Da 100 a 500 W	2,1 - 1,8
Da 500 a 2000 W	1,8 - 1,6
Da 2000 a 5000 W	1,6 - 1,4

Per cui, trovato il numero di spire primarie totali, con la tabella apposita si trova l'ingombro del primario in sp/cm². Lo stesso si fa per il secondario (o i secondari se più di uno), poi si sommano per trovare l'ingombro totale netto e si moltiplicano per il coefficiente relativo alla potenza impegnata, trovando così l'effettiva superficie impegnata della finestra. Nell'eventualità che la finestra risulti più piccola del necessario si può giostrare sulla densità di corrente, aumentandola leggermente, soprattutto nel caso che il trasformatore non debba funzionare continuamente a pieno regime. Oppure aumentandola soltanto per quei secondari che vengano usati in modo intermittente.

Se invece l'area della finestra risulta sovrabbondante, come nel caso di lamierini sovradimensionati (spessore del pacco minore della larghezza di "C"), la densità di corrente si può diminuire, cercando di occuparla completamente per evitare eccessivo flusso disperso, ottenendo un trasformatore con minore resistenza ohmica e perciò con minore caduta di tensione a carico, anche se con maggior dispendio di rame.