

## Retificadores

(ENG - 20301)

### Tutorial de Confeção de Indutor em PCB (Exemplo)1

#### Projeto do Indutor

Para o projeto do indutor pode-se especificar:

- Indutância:  $L = 1,0 \mu\text{H}$ ;
- Corrente: 1 A.

Com base na corrente pode-se escolher a largura da trilha, usando para isso a figura 1, a seguir. Nesta figura verifica-se que para uma corrente de 1 A será necessária uma largura da ordem de 10 mils.

Pode-se adotar também o critério de densidade de corrente, da mesma forma que se procede para condutores de cobre na confecção de transformadores e indutores. A área da trilha pode ser calculada conhecendo a espessura da trilha ( $h$ ) e a largura da mesma ( $w$ ). Na figura abaixo se mostra como determinar a área da trilha. A espessura mais comum é da ordem de 35  $\mu\text{m}$ . Se adotarmos uma densidade de corrente de  $450 \text{ A/cm}^2$  e para uma corrente de 1 A:

$$d = 450 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$
$$S_{\text{trilha}} = \frac{I}{d} = w \cdot h$$
$$w = \frac{I}{d \cdot h} = \frac{1 \text{ A}}{450 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \cdot 35 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} = 0,635 \text{ cm} = 63,5 \text{ mm} = 2500 \text{ mils}$$

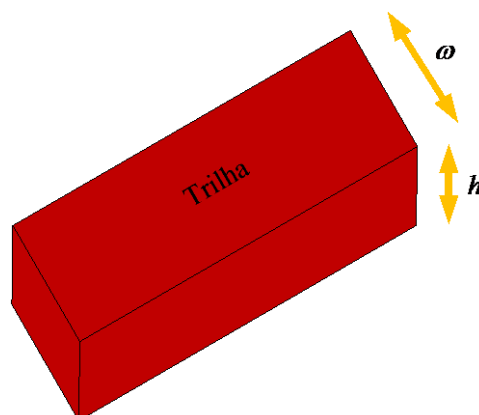


Figura 1 – Cálculo da área da trilha.

Pode-se verificar deste cálculo que a densidade de corrente adotada em placas de circuito impresso é bem maior do que  $450 \text{ A/cm}^2$ .

No tutorial intitulado “PCB Design Tutorial” de David L. Jones é dada uma tabela com alguns valores de corrente e a largura da trilha, para espessuras de cobre de uma onça por polegada quadrada (1 oz). Esta mesma unidade é usada na figura 2.

Track Width Reference Table (for 10deg C temp rise). Track Width is in Thous (mils)			
Current (Amps)	Width for 1oz	Width for 2 oz	milli Ohms/Inch
1	10	5	52
2	30	15	17.2
3	50	25	10.3
4	80	40	6.4
5	110	55	4.7
6	150	75	3.4
7	180	90	2.9
8	220	110	2.3
9	260	130	2.0
10	300	150	1.7

No entanto, para facilitar a elaboração da placa pelo processo artesanal, pode-se adotar 40 mils como largura das trilhas. Portanto:

$$\omega = 40 \text{ mil} = 1,016 \text{ mm}$$

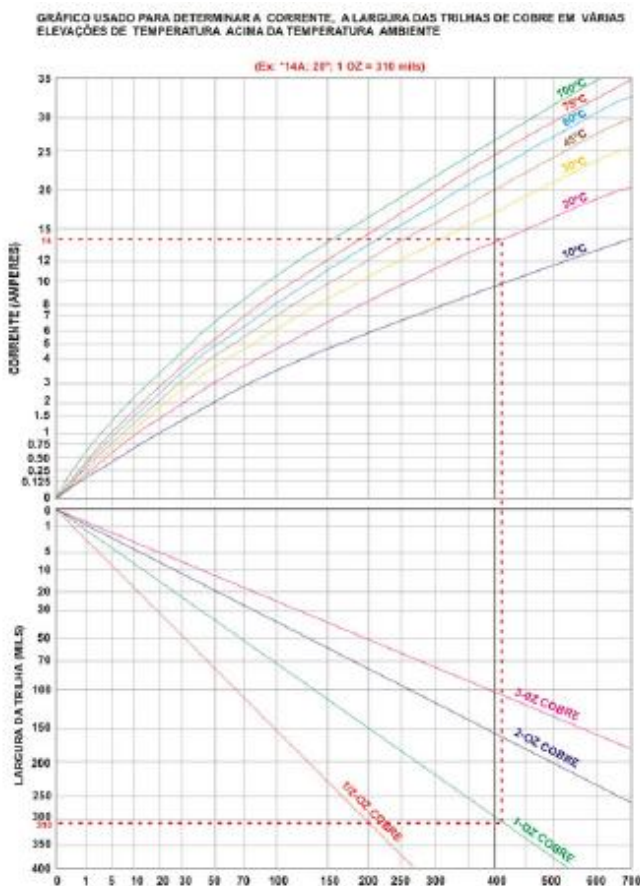


Figura 2 – Gráfico para obter a largura da trilha em função da corrente.

A conversão entre mils (uma polegada dividida por mil) e milímetros é:

$$1 \text{ mil} = \frac{2,54 \text{ cm}}{1000} = \frac{25,4 \text{ mm}}{1000} = 0,0254 \text{ mm}$$

Neste caso, 50 mils corresponde a:

$$\text{Largura}_{\text{mm}} = \frac{25,4 \text{ mm}}{1 \text{ mil} \cdot 1000} \cdot \text{Largura}_{\text{mil}} = \frac{25,4 \text{ mm}}{1 \text{ mil} \cdot 1000} \cdot 50 \text{ mil} = 1,27 \text{ mm}$$

Por outro lado, para obter o valor em mils:

$$\text{Largura}_{\text{mil}} = \frac{1 \text{ mil} \cdot 1000}{25,4 \text{ mm}} \cdot \text{Largura}_{\text{mm}} = \frac{1 \text{ mil} \cdot 1000}{25,4 \text{ mm}} \cdot 1,27 = 50 \text{ mil}$$

Alguns valores comuns, aproximados, são dados a seguir:

1 mil	0,0254 mm
5 mil	0,127 mm
10 mil	0,254 mm
20 mil	0,508 mm
30 mil	0,762 mm
40 mil	1,016 mm
50 mil	1,27 mm
60 mil	1,524 mm
70 mil	1,778 mm
80 mil	2,032 mm
90 mil	2,286 mm
100 mil	2,54 mm

O espaçamento entre as trilhas depende do processo usado para elaboração da placa de circuito impresso. Quando se usa fresagem, a distância entre as trilhas é determinada pela precisão e ferramenta utilizada pela máquina. Ao confeccionar a placa pelo processo de corrosão, artesanal, deve-se deixar uma distância razoável entre as trilhas, para evitar que as mesmas permaneçam unidas após a corrosão. Pode-se adotar então um espaçamento de 1,016 mm. Assim:

$$s = 40 \text{ mil} = 1,016 \text{ mm}$$

Para aplicar a expressão que determina a indutância seria necessário conhecer o comprimento interno do indutor, comprimento externo e número de espiras. No entanto, o número de espiras é a variável procurada na equação a seguir:

$$L = k_1 \cdot \mu_o \cdot \frac{N^2 \cdot d_{\text{avg}}}{1 + k_2 \cdot \rho}$$

Onde:

- $k_1 = 2,34$  e  $k_2 = 2,75$  para formato quadrado;
- $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{Wb/A} \cdot \text{m}]$ ;
- $N$  = número de espiras;
- $d_{\text{avg}} = \frac{d_{\text{out}} + d_{\text{in}}}{2}$  [m] = comprimento médio;
- $\rho = \frac{d_{\text{out}} - d_{\text{in}}}{d_{\text{out}} + d_{\text{in}}}$  [m] = razão dos comprimentos interno e externo.

O indutor em projeto está mostrado na figura abaixo.

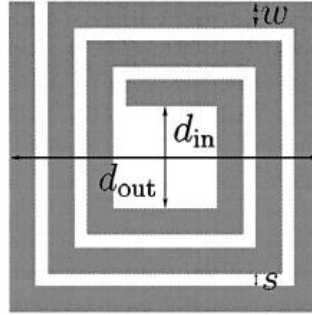


Figura 3 – Indutor em projeto.

Considerando um comprimento interno de aproximadamente 1 cm:

$$d_{in} \cong 1,016 \text{ cm} = 10,16 \text{ mm} = 400 \text{ mil}$$

Com base na figura 2, pode-se obter que:

$$d_{util} = \frac{d_{out} + d_{in}}{2} \text{ e } d_{util} \cong \omega \cdot N + s \cdot (N - 1) = N \cdot (\omega + s) - s$$

Daí pode-se escrever:

$$\frac{d_{out} + d_{in}}{2} = N \cdot (\omega + s) - s$$

$$d_{out} = 2 \cdot [N \cdot (\omega + s) - s] + d_{in}$$

E prosseguindo:

$$d_{avg} = N \cdot (\omega + s) - s + d_{in}$$

$$\rho = \frac{N \cdot (\omega + s) - s}{N \cdot (\omega + s) - s + d_{in}}$$

Tem-se então a expressão completa para calcular a indutância:

$$L = k_1 \cdot \mu_o \cdot N^2 \cdot \frac{N \cdot (\omega + s) - s + d_{in}}{1 + k_2 \cdot \frac{N \cdot (\omega + s) - s}{N \cdot (\omega + s) - s + d_{in}}}$$

A solução desta expressão não é trivial, e para facilitar a obtenção do número de espiras (N) mostra-se um ábaco na figura 3 a seguir. Nesta figura, o número de espiras varia de 1 à 10 e a indutância calculada de 0 à 3,5  $\mu\text{H}$ .

Por exemplo, consultando a figura 3, para obter uma indutância de 1  $\mu\text{H}$  serão necessárias aproximadamente 6 espiras. Aplicando este número de espiras na equação se obtém:

$$L = 2,34 \cdot 4\pi \cdot 10^7 \cdot 6^2 \cdot \frac{6 \cdot (1,016 \cdot 10^{-3} + 1,016 \cdot 10^{-3}) - s + 10,16 \cdot 10^{-3}}{1 + 2,75 \cdot \frac{6 \cdot (1,016 \cdot 10^{-3} + 1,016 \cdot 10^{-3}) - 10,16 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot (1,016 \cdot 10^{-3} + 1,016 \cdot 10^{-3}) - 1,016 \cdot 10^{-3} + 10,16 \cdot 10^{-3}}} = 0,925 \mu\text{H}$$

Alguns valores de indutância e de largura externa em função do número de espiras são mostrados na tabela abaixo. Para determinar a largura externa usou-se:

$$d_{out} = 2 \cdot [N \cdot (\omega + s) - s] + d_{in}$$

N [espiras]	L [ $\mu\text{H}$ ]	$d_{\text{out}}$ [mm]
1	0,026	12,192
2	0,095	16,256
3	0,21	20,32
4	0,381	24,384
5	0,616	28,448
6	0,925	32,512
7	1,318	36,576
8	1,804	40,64
9	2,392	44,704
10	3,092	48,768

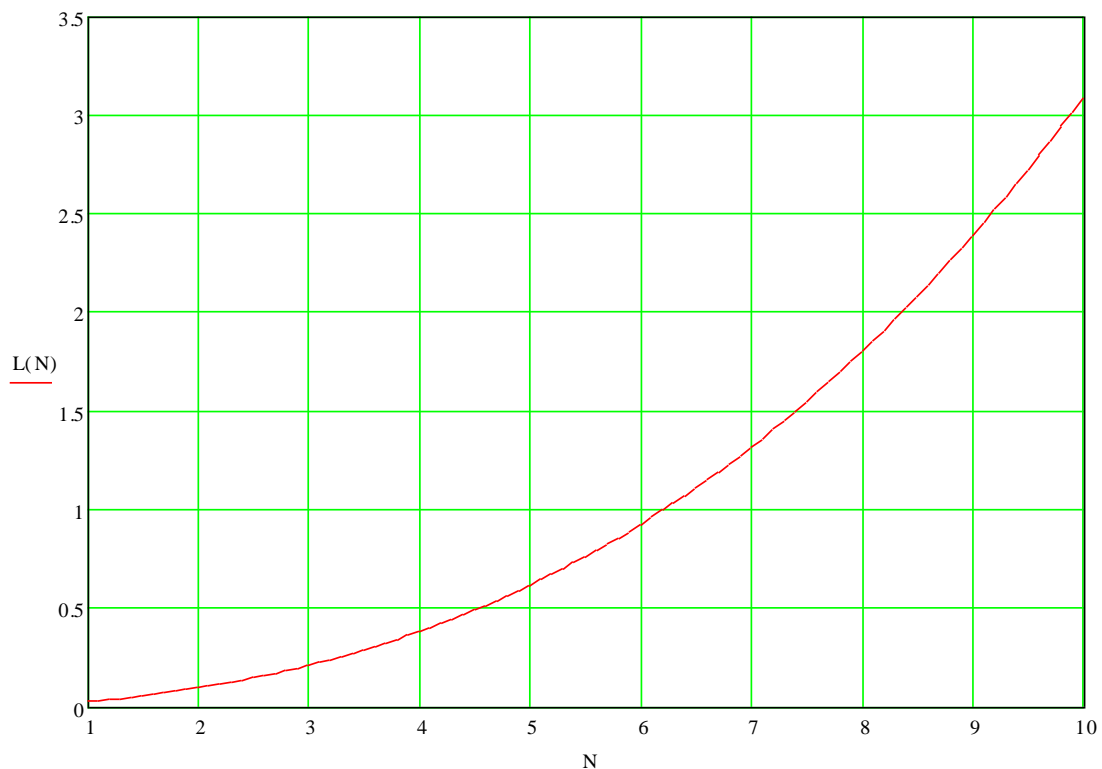


Figura 4 – Ábaco para determinar o número de espiras em função da indutância em  $\mu\text{H}$ .

É importante salientar que estes cálculos são aproximados e valor obtido na prática será diferente do determinado aqui. Para se obter valores mais condizentes com os práticos seria necessário usar algum software de simulação de elementos eletromagnéticos.

Para finalizar esta etapa de projeto do indutor, mostra-se abaixo um resumo dos dados necessários para o desenho no software de placas de circuito impresso.

- $L \cong 1 \mu\text{H}$  ;
- N = 6 espiras;
- $\omega = 1,016 \text{ mm} = 40 \text{ mil} =$  largura das trilhas;
- $s = 1,016 \text{ mm} = 40 \text{ mil} =$  espaçamento entre as trilhas;
- $d_{\text{in}} = 10,16 \text{ mm} = 400 \text{ mil} =$  largura interna do indutor;
- $d_{\text{out}} = 32,512 \text{ mm} = 1280 \text{ mil} =$  largura externa do indutor.

## Desenho do indutor na PCB

Iniciei o Proteus abrindo o Ares. A janela característica do Ares está mostrada na figura 5, abaixo.

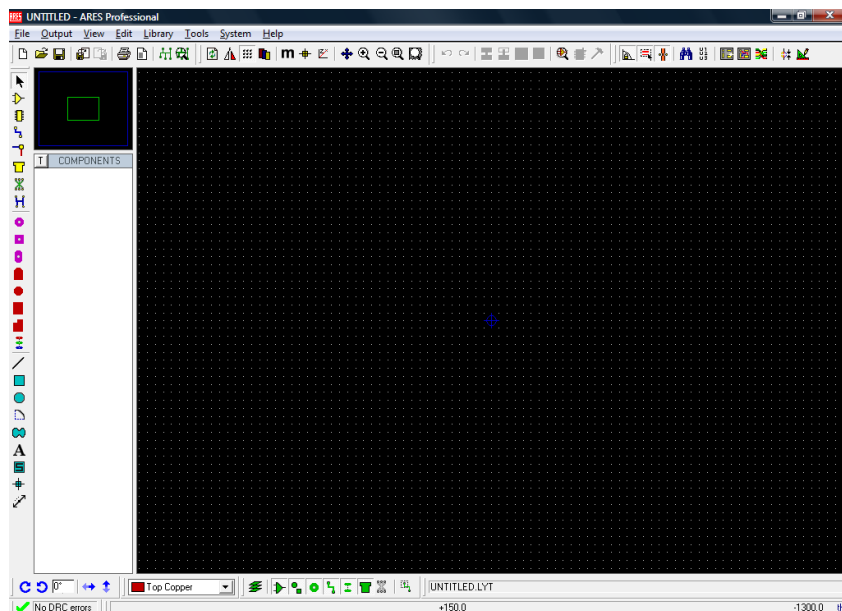


Figura 5 – Janela característica do Ares.

Escolha no layer (camada) a opção *Board Edge* e desenhe um retângulo, conforme a figura 6.

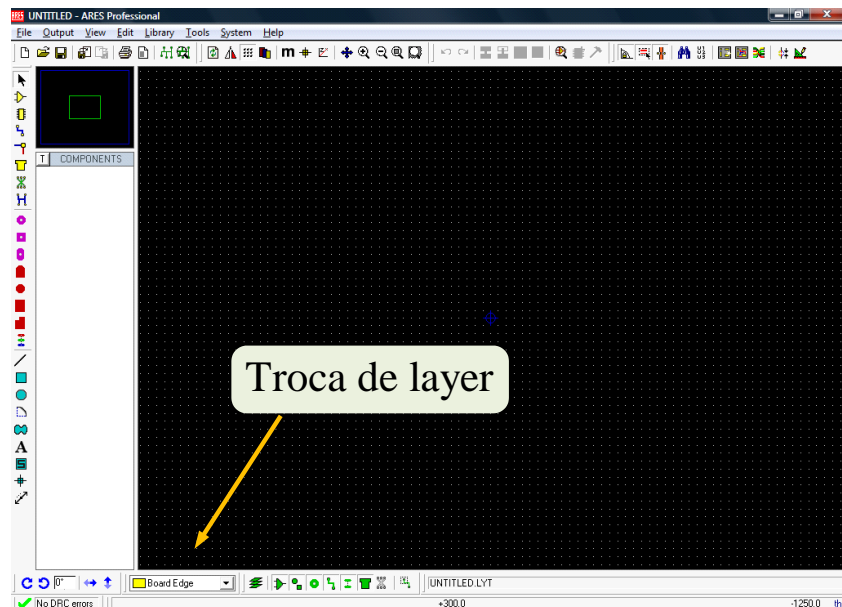


Figura 6 – Escolha do layer adequado.

Atente para as coordenadas mostradas na tela, que auxiliam no desenho de objetos com dimensões bem definidas.

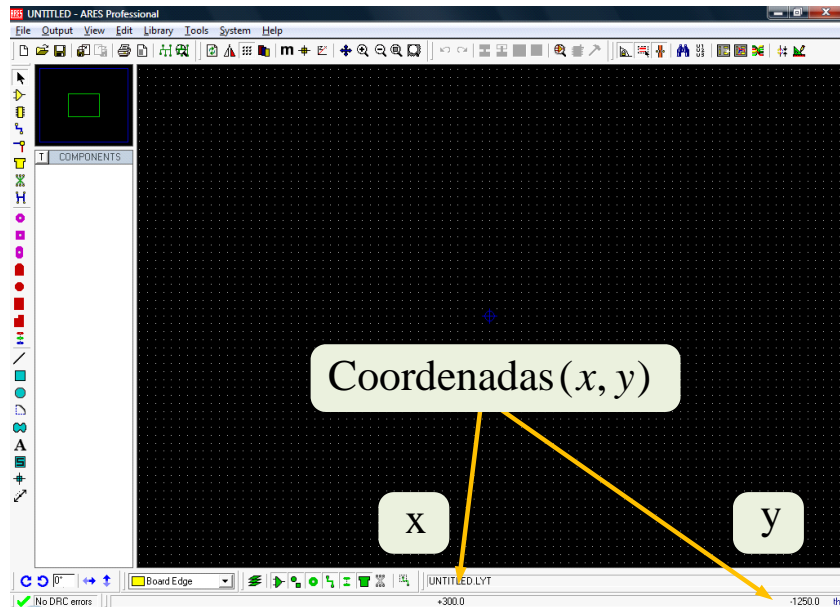


Figura 7 – Coordenadas  $x$  e  $y$  em mils ou milímetros.

Observe que existe um ponto na tela que indica as coordenadas  $x = 0$  e  $y = 0$ .

Mantenha o cursor em algum ponto da tela e aperte a tecla **o** tornando este ponto a coordenada  $(0, 0)$ .

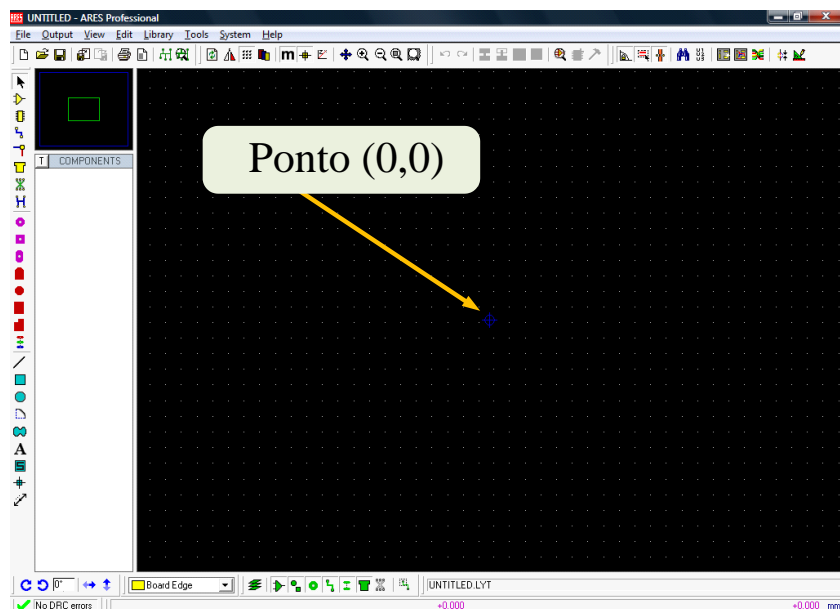


Figura 8 – Ponto com coordenada  $(0,0)$ .

Em seguida defina um tamanho aproximado para a placa, desenhando um retângulo na tela de tamanho 5 cm x 5 cm, ou seja 50 mm x 50 mm.

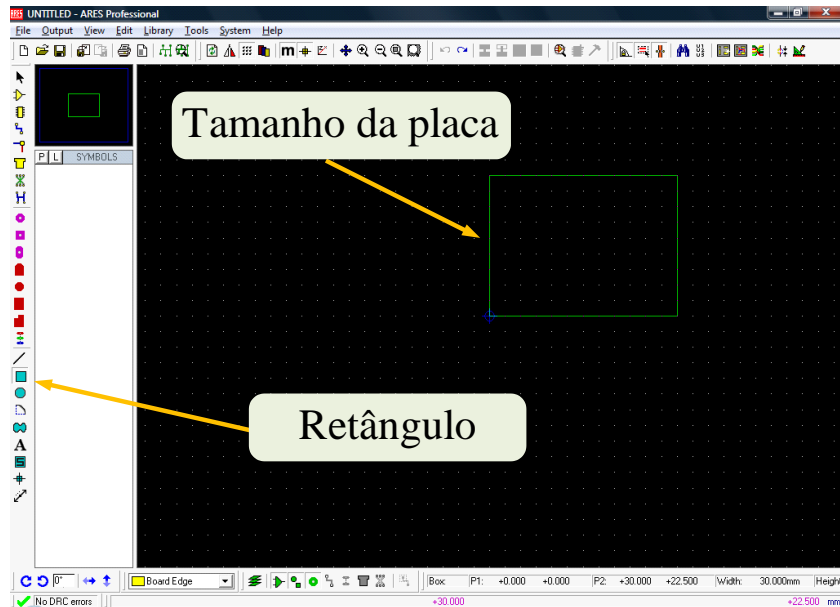


Figura 9 – Definição das dimensões da placa.

Note na figura 10 as dimensões da placa, aproximadas, visto que não se conhece ainda o tamanho final da mesma.

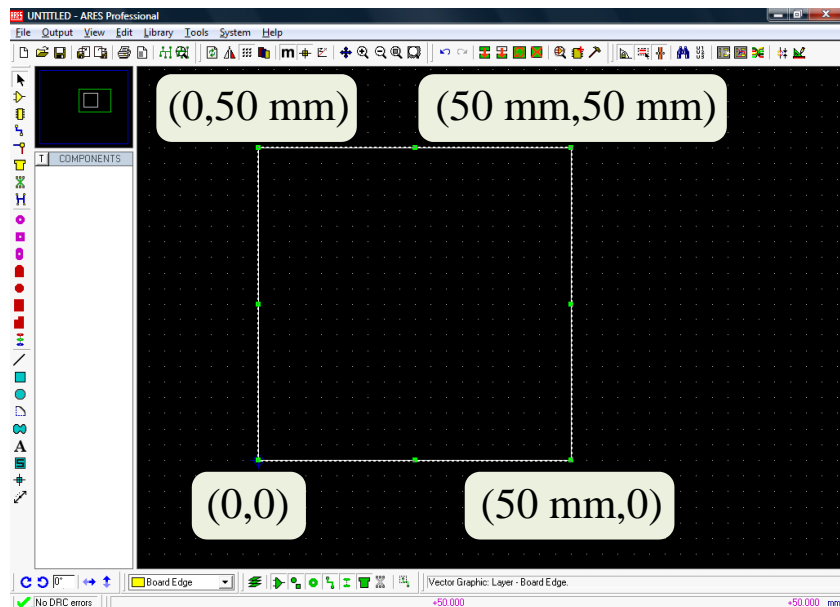


Figura 10 – Área da placa definida.

O *grid* (escala) pode ser alterado livremente para facilitar o desenho de objetos. Como neste exemplo de projeto e desenho de indutor se está usando múltiplos de 40 mils, então é mais adequado modificar o *grid* (grade) conforme mostrado na figura 11.

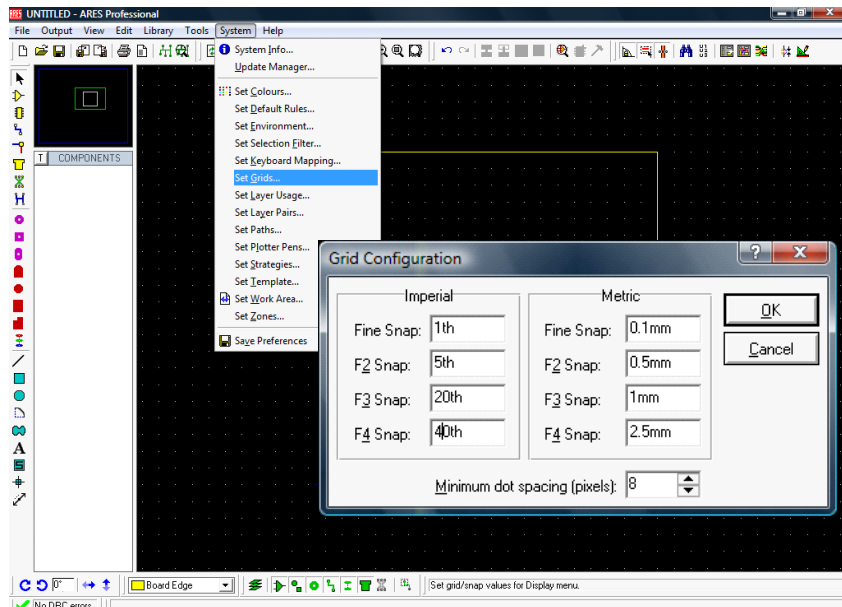


Figura 11 – Alteração das propriedades do grid.

Observe na figura 12 que o *grid* está em mm. Para alterar para mils deve-se pressionar a tecla **m** do teclado, alternando assim entre os dois sistemas métricos. Observe a figura 13.

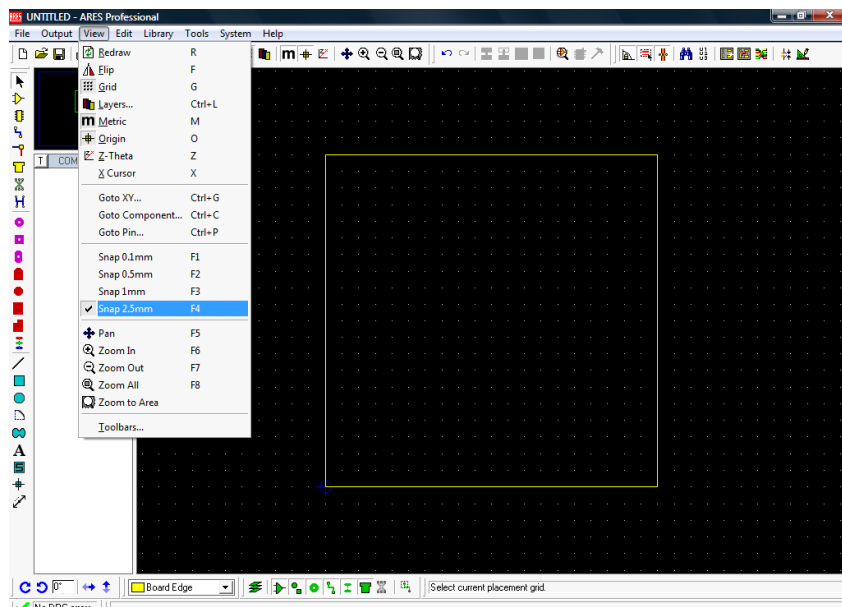


Figura 12 – Especificação do grid atual.

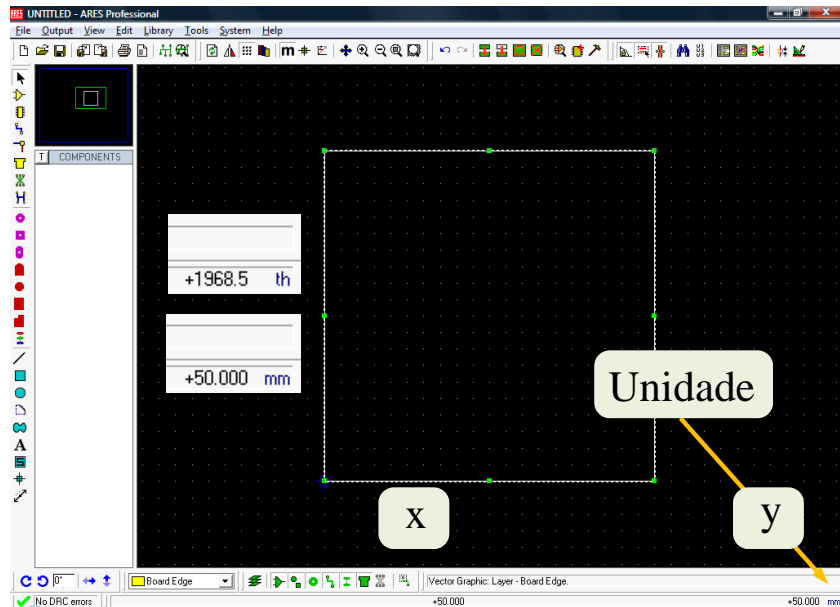


Figura 13 – Alteração para mils.

Desenhe um retângulo interno com dimensões de  $d_{in}$  x  $d_{in}$ , ou seja, de 400 mils x 400 mils. Note que o *layer* foi modificado para *Top Silk* (texto no topo da placa).

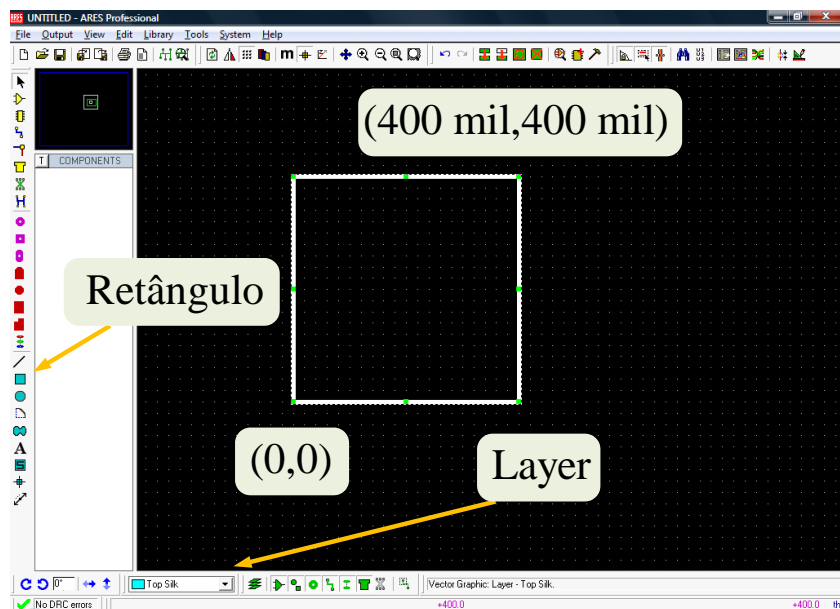


Figura 14 – Retângulo interno com tamanho  $d_{in}$ .

Inicie agora o desenho das trilhas, ou seja, das 6 espiras do indutor. Para isso escolha a camada *Top*. Na verdade esta é a camada em que ficam os componentes, ou seja, o lado dos componentes. Em uma placa de face simples se utilizaria então apenas o lado chamado de *Bottom*. O detalhe é que neste caso na impressão o desenho da placa deve ser espelhado. Desta forma é mais simples desenhar as trilhas numa placa de face simples no lado chamado de *Top*.

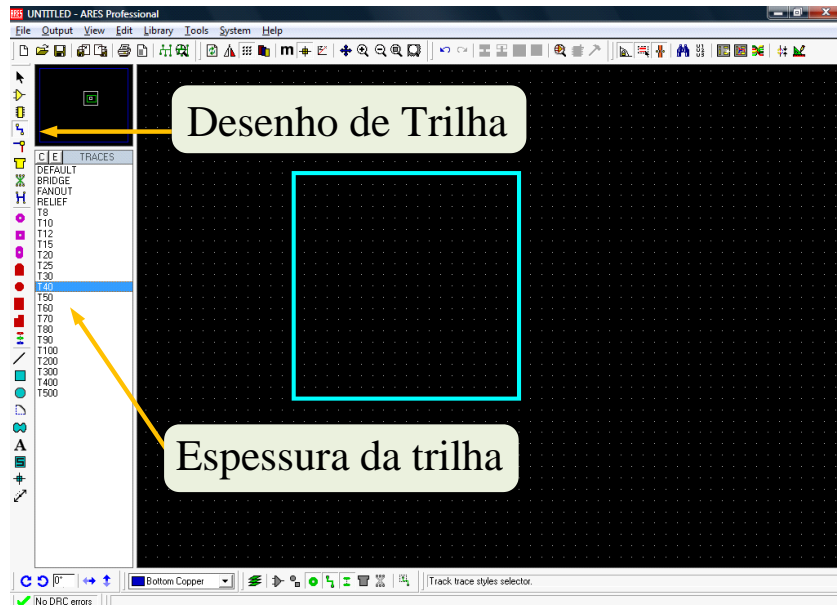


Figura 15 – Escolha da espessura da trilha.

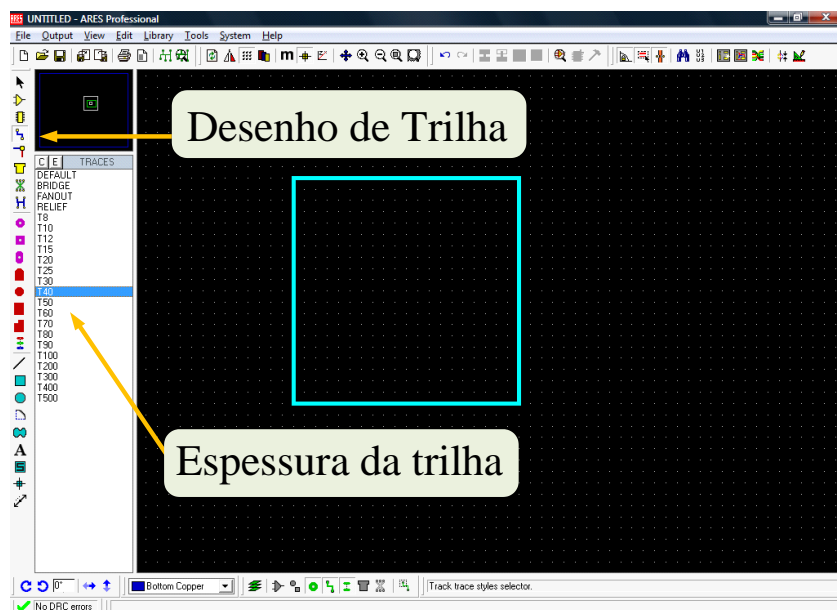


Figura 16 – Escolha da espessura da trilha.

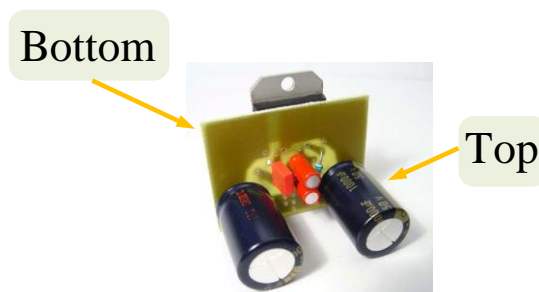


Figura 17 – Lado dos componentes (Top) e lado das trilhas (Bottom).

Escolha um dos lados do retângulo interno do indutor e inicie o desenho das trilhas. Cuidado para respeitar as dimensões e espaçamentos especificados. O espaçamento deve ser respeitado nos quatro lados das trilhas.

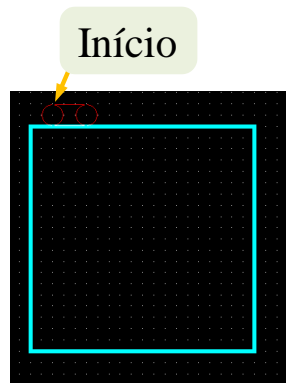


Figura 18 – Início do desenho das trilhas.

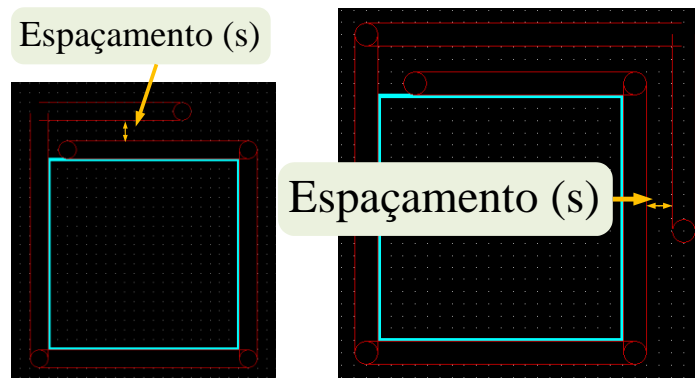


Figura 19 – Cuidado no espaçamento entre as trilhas.

Ao final as trilhas desenhadas terão o aspecto mostrado na figura 20.

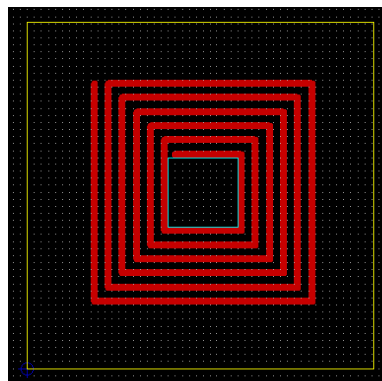


Figura 20 – Indutor desenhado.

Para facilitar a possível conexão de algum elemento ao indutor, podem ser colocadas vias no início e final das trilhas, conforme mostrado na figura 21. Os *pads* não ultrapassam a placa, enquanto as vias ultrapassam e podem ser metalizadas para conectar do *layer top* ao *layer bottom*.

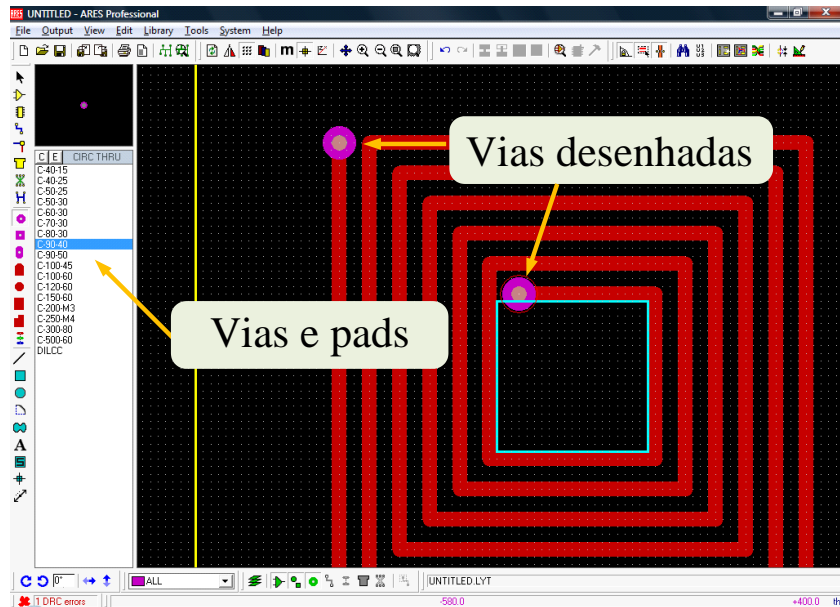


Figura 21 – Inserção de vias ou pads.

Finalmente o tamanho da placa pode ser redefinido para o tamanho final que o indutor efetivamente ocupou.

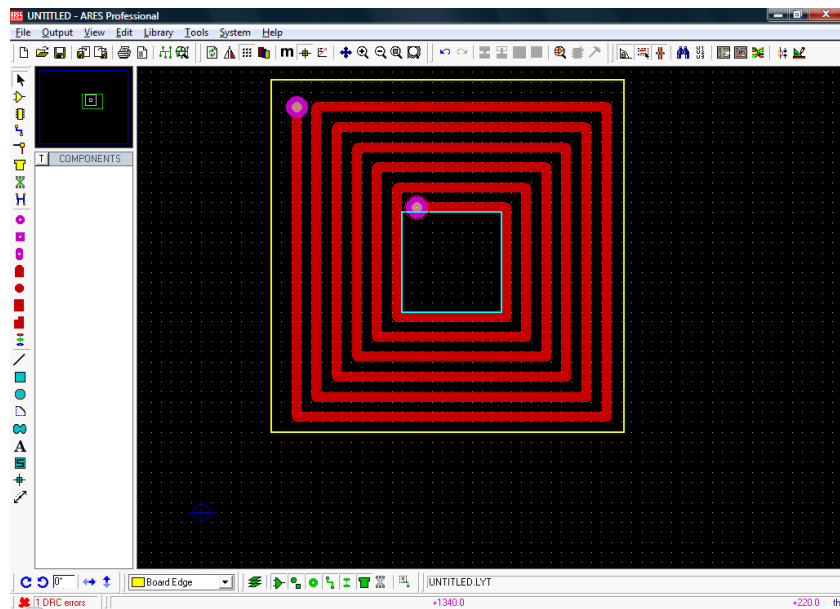


Figura 22 – Finalização com tamanho final da placa.