Recebido: 29-01-2025 | Aprovado: 28-04-2025 | DOI: https://doi.org/10.23882/rmd.25285

Contribuição para o estudo de um arranjo de antenas Patch em U com substrato de cartão e microtira em óxido cuproso

Contribution to the study of a U-shaped Patch antenna array with cardboard substrate and cuprous oxide microstrip

Emanuel Eduardo Pires Vaz,
Universidade do Porto, NYAS, Portugal
(eepv@yahoo.com)

Resumo:
Descreve-se um arranjo com antenas Patch em substrato de papel devidamente experimentadas e a determinação dos campos elétrico próximo e magnético longínquo.

Palavras-chave: Arranjo de antenas, Antena Patch, substrato

Abstract:
An array with patch antennas on a paper substrate, duly tested, and the determination of the near electric and far magnetic fields are described.

Keywords: Antenna array, patch antenna, substrate.

Introdução

Uma antena em U modificada feita sobre um substrato de cartão foi o exemplo que proponho explicar aos alunos no livro que se está a preparar Antenas Propagação, sucedâneo de outro que se publicou com a teoria das antenas usuais, [Vaz , 1986] e aplicável no contexto do tema aqui tratado.

Determine-se o campo elétrico nas imediações da antena Patch, Fig. 1, com dimensão no eixo dos x tomada como c e no eixo dos y como d.

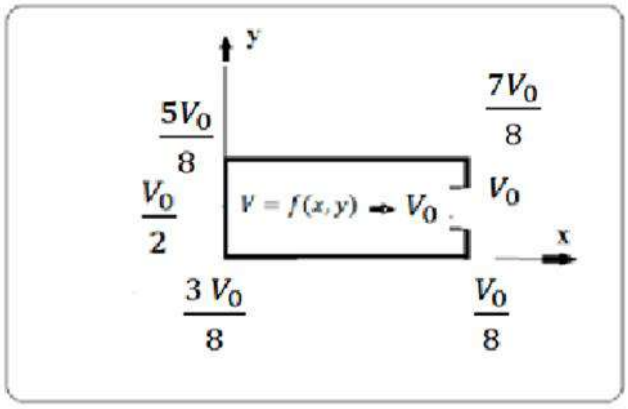

Fig. 1 –

Trata-se de um problema semelhante a um de Dirichlet para a banda plana da figura. Vamos determinar a função potencial, V, campo elétrico num ponto do espaço próximo.

Procuremos uma solução do problema pelo método das subreposições das soluções fornecidas pela separação de variáveis: $\exp(ax)\cos(ay)$, exp(ax) sen(ay), exp(by) cos (bx), exp(by) sen (bx) para todas as constantes a e b, e enfim, 1, x,y,xy.

Comecemos por não sobrepor senão soluções que satisfaçam o mais possível às condições limites pois queremos que $V \rightarrow V_0$, quando $x \rightarrow +\infty$, ou seja a d.d.p. tende para zero quando x tende para d. Restringir-nos –emos à sobreposição de soluções tais que $\exp(ax)\cos(ay)$ e $\exp(ax)\,\mathrm{sen}(ay) \leftarrow \; a > 0$. Já que queremos que $y = 0$, então, $V \neq 0$ teremos termos em $\exp(ax)\cos(ay)$ Uma vez que queremos também que para todo o x e y seja $V \neq 0$. Como é aproximadamente o máximo da d.d.p. em $x = c$, $V \neq 0$, $y \approx \frac{d}{2}$ temos soluções em $\exp(ax)\,\mathrm{sen}(ay)$ ou $\exp(-ax)\,\mathrm{sen}(ay)$ com $a = \frac{\pi}{2} + 2n\pi$, Ficam pois soluções do tipo $\exp(ax)\cos(ay)$ que vamos mostrar que são soluções do problema, que podemos sobrepor em:

$V = \sum_{-1}^{1} B_n\, exp(ax) cos\,(ay) + \sum_{-1}^{1} C_n \exp(ax)\,\mathrm{sen}(ay) +$
$\sum_{-1}^{1} D_n \exp(-ax)\,\mathrm{sen}(ay) + x + y + 1 + xy$. serão as soluções que nos interessarão.

Não, manifestamente possível com uma soma finita, mas é-o com uma série de Fourier, uma série de senos de V sobre $\left[3\frac{V_0}{8}, 5\frac{V_0}{8}\right]$, série de período $T = 2\frac{V_0}{8}$, uniformemente convergente sobre $\left[3\frac{V_0}{8}, 5\frac{V_0}{8}\right]$, pois V é monótona por intervalos e contínua.

Estes cálculos são justificados pois majorando em valor absoluto por séries geométricas de razão constante $\exp(-2\pi h)$, se vê que as séries e as séries derivadas parcialmente termo a termo primeira e segunda são absolutamente e uniformemente convergentes para $x > h > 0$ para todo o y. Isto não prova senão a existência, mas não a unicidade da solução apresentada.

Esta equação para V pode ser posta da seguinte forma

$$V = [A\exp(\alpha x) + Bexp(-\alpha x)][(C\cos(\alpha y) + D\ sen\ (\alpha y))] + 1 + x + y + xy$$

Antes de descrever um problema físico e forçar as constantes que aparecem em série a satisfazer às condições de contorno previstas, consideremos a natutreza física do potencial dado por uma simples escolha destas constantes. Escolhendo A=0, C=0 e BD=V_0 , temos: Vamos já dar uma explicação para a unidade. O potencial não pode subir sempre e terá de ser $BD\exp(-ax)\,sen(ay) + 1 + x + y + xy = V_0|_{x=d,y=\frac{c}{2}}$

$$BD\exp(-ax)\,sen(ay) + 1 + x + y + xy|_{x=d,y=\frac{c}{2}} = V_0$$

Sendo assim, $BDsen(-ad) + sen(ac) + 1 + d + c + cd = V_0$, mas

$V_0 \approx máx\ exp(-ad)sen(ac) \Rightarrow sen(ac) = 1 \quad \Leftrightarrow a \times \frac{c}{2} = \frac{\pi}{2} + 2n\pi \Leftrightarrow a = \frac{(1+2m)\pi}{c}$

$$BDexp\left[-\frac{(1+2m)\pi}{c}\ d\right] sen\left(\frac{(1+2m)\pi}{2}\right) + 1 + d + \frac{c}{2} + \frac{c}{2}d = V_0 \Leftrightarrow$$

$$BD = \frac{V_0}{exp\left[-\frac{(1+2m)\pi}{c}\ d\right] sen\left(\frac{(1+2m)\pi}{2}\right) + 1 + d + \frac{c}{2} + \frac{c}{2}d}$$

$$V = \frac{V_0}{exp\left[-\frac{(1+2m)\pi}{c}d\right] sen\left(-\frac{(1+2m)\pi}{2}\right) + 1 + d + \frac{c}{2} + \frac{c}{2}d} \times \left[exp\left(-\frac{(1+2m)\pi}{c}\ x\right) sen\left(\frac{(1+2m)\pi}{c}y\right) + 1 + x + y + xy\right]$$

$$V = \frac{V_0}{exp\left[-\frac{(2m+1)\pi}{c}d\right] sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right) + 1 + d + \frac{c}{2} + \frac{c}{2}d_0} \left[senh\left(\frac{(2m+1)\pi}{c}x\right) sen\ \left(\frac{(2m+1)\pi}{c}y\right) + 1 + x + y + xy\right].$$

O fator $senh(\alpha x) = 0\,|_{x=0}$ cresce suavemente com x, tornando-se quase logo exponencial, pois:

$$senh(\alpha x) = \frac{1}{2}(\exp(\alpha x) - \exp(-\alpha x))$$

Finalmente podemos desenvolver a superfície equipotencial, escolhendo a expressão anterior com : $a = \frac{(2m+1)\pi}{2c}$

É claro que para cada valor de V_0 temos infinitos valores de campos satisfazendo a esta condição. Somando membro a membro podemos ter o somatório também, solução para o problema. Trata-se de um ideal das soluções do problema resolvido pela equação diferencial que já dissemos ter solução. O índice em V_{0m} indica que este fator de amplitude terá valor diferente para cada diferente valor de m.

$$V = \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{V_{0m}}{exp\left[-\frac{(2m+1)\pi}{2}\right] sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right)+1+d+\frac{c}{2}+\frac{c}{2}d} \left[senh\left(\frac{(2m+1)\pi}{c}x\right) sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{c}y\right) + 1 + x + y + xy\right].$$

Note-se que a célula é praticamente quadrada, logo como as diferenças de potencial foram distribuídas uniformemente precisamos só de uma dimensão o $c = d$. Note-se que aqui o valor c corresponde a um comprimento, o do lado da célula fratal, enquanto nas formulações do campo elétrico tangencial num condutor era uma constante diferente.

Vamos exprimir os valores de V no contorno.

$$V_0 - \frac{V_0}{(2c+2d)}x = V|_{y=c, x\epsilon]0,d[}$$

$$\frac{3V_0}{8} - \frac{V_0}{(2c+2d)}x = V|_{y=0, x\epsilon]0,d[}$$

$$\frac{3V_0}{8} + \frac{V_0}{(2c+2d)}y = V|_{x=0\ , y\epsilon]0,c[}$$

$$\frac{V_0}{8} - \frac{V_0}{(2c+2d)}y = V|_{x=d, y\epsilon]0,\frac{c}{2}[}$$

$$\frac{7V_0}{8} + \frac{V_0}{(2c+2d)}y = V|_{x=d, y\epsilon]0,\frac{c}{2}[}$$

Temos três porções de função só dependentes de y e duas porções só dependentes de x. Para o caso do nosso fratal temos, $c = d$. Daí que:

$$V_0 = \frac{4c}{4c-x}\sum_{m=1}^{+\infty}\frac{V_{0m}}{exp[-(1+2m)\pi]sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right)+1+d+\frac{c}{2}+\frac{c}{2}d}\left[senh\left(\frac{(2m+1)\pi}{c}x\right)\times sen\left((2m+1)\pi\right)+1+x+c+xy\right]|_{y=c,x\epsilon]0,d[}$$

$$V_0 = \frac{8c}{3c-2x}\sum_{m=1}^{+\infty}\frac{V_{0m}}{exp\left[-\frac{(2m+1)\pi}{2}\right]sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right)+1+d+\frac{c}{2}+\frac{c}{2}d}\left[1+x+xy\right]|_{y=0,}x\epsilon]0,d[$$

$$V_0 = \frac{8c}{3c+2y}\sum_{m=1}^{+\infty}\frac{V_{0m}}{exp\left[-\frac{(2m+1)\pi}{2}\right]sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right)+1+d+\frac{c}{2}+\frac{c}{2}d}\left[1+y+xy\right]|_{x=0\,,y\epsilon]0,c[}$$

$$V_0 = \frac{16c}{c-2y}\sum_{m=1}^{+\infty}\frac{V_{0m}}{exp\left[-\frac{(2m+1)\pi}{2}\right]sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right)+1+d+\frac{c}{2}+\frac{c}{2}d}\left[senh\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right)sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{c}y\right)+1+x+y+xy\right]|_{x=d,y\in\left]0,\frac{c}{2}\right[}$$

$$V_0 = \frac{8c}{7c+2y}\sum_{m=1}^{+\infty}\frac{V_{0m}}{exp[-(2m+1)\pi]sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right)+1+d+\frac{c}{2}+\frac{c}{2}d}\times\left[senh\left((2m+1)\pi\right)sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{c}y\right)+1+x+y+xy\right]|_{x=d,y\in\left]0,\frac{c}{2}\right[}$$

Note-se que o cálculo dos fatores de amplitude de dentro do somatório se pode fazer desenvolvendo em série de Fourier, pois são funções só de m. Por exemplo na última das equações temos:

$$V_0 = \frac{8c}{7c+2y}\left\{\sum_{m=1}^{+\infty}c_m\,sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{c}y\right)+\sum_{m=1}^{+\infty}c'_m\,(1+d+y+dy)\right\}|_{x=d,y\in\left]0,\frac{c}{2}\right[}$$

O problema para a fonte periódica mais simples dá resultados fáceis se escolhermos o intervalo $y\epsilon[0,\ c]$ com $V = V_0$ e ainda no semiperíodo adjacente $x\epsilon[c, 2c]$ escolhermos como semiperíodo $V = -V_0$, ou seja,

$$\begin{cases} V = V_0 \ \Leftarrow \ y\epsilon[0,\ d] \\ V = -V_0 \Leftarrow \ y\epsilon[b,\ 2d] \end{cases}$$

Os coeficientes são: $c_m = \frac{1}{c}\left[\int_0^c V_0\, sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2c}y\right)dy + \int_c^{2c} -V_0\, sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2c}y\right)dy\right]$

Isto leva a que: $c_m = \begin{cases} \frac{4V_0}{(2m+1)\pi} \leftarrow \ m\ ímpar \\ 0 \ \leftarrow m\ par \end{cases}$

Então neste intervalo de função teríamos:

$$c_m = \frac{V_{0m}}{exp[-(2m+1)\pi]sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right)+1+d+\frac{c}{2}+\frac{c}{2}d}\quad senh[(2m+1)\pi] \quad \Rightarrow$$

$$V_{0m} = \frac{4V_0}{(2m+1)\pi}\times\frac{1}{senh\big((2m+1)\pi\big)} \times\left[exp[-(2m+1)\pi]sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right)+1+\frac{c}{2}+\frac{3}{2}d\right]$$

$$c'_m = \frac{c_m}{senh\big((2m+1)\pi\big)}$$

E neste intervalo da função temos pois, para m ímpar:

$$V = \frac{4V_0}{\pi}\sum_{m=1}^{+\infty}\frac{1}{(2m+1)} \times\frac{1}{senh\big((2m+1)\pi\big)}\left[senh\left(\frac{(2m+1)\pi}{c}x\right)sen\left(\frac{(2m+1)\pi}{c}y\right) + 1 + x + y + xy\right]\Big|_{x=d,y\in\left]0,\frac{c}{2}\right[}$$

Vamos registar um processo iterativo de resolução do espetro do potencial num programa FORTRAN [$Hayt, 1983$].

PROGRAMA FORTRAN

```
1   DIMENSION A (17, 17),B(17,17)
2   DO 6I=2,17
3   DO 5.I= 1,17
4   A(I,J)=0
5   CONTINUE
6   CONTINUE
7   DO 9J 2,16
8   A(I,J)=100.
9   CONTINUE
10  A(I,I)=50.
11  A(I,J) = 50
12  DO 16I= 2,16
13  DO 15J= 2.16
14  A(I,J) =(A(I,J-1)+ A(I-I,J)+ A(I,J+1)+ A(I+I,J))/4.
15  CONTINUE
16  CONTINUE
17  DO 23I=2.16
18  DO 22J=2,16
19  DO C=(A(I,J-1)+A((I-I,J)+A(I,J+1)+A(I+I,J)))/4
20  B(I,J)=A()I,J)-C
21  IF ()ABS(B(I,J).00001.GT.0.) GO TO 12
22  CONTINUE
23  CONTINUE
24  24 WRITE (6,25((A(I,J), J=1,17), I=1.17)
25  FORMAT (1HO, 17F7.2)
26  STOP
27  END
```

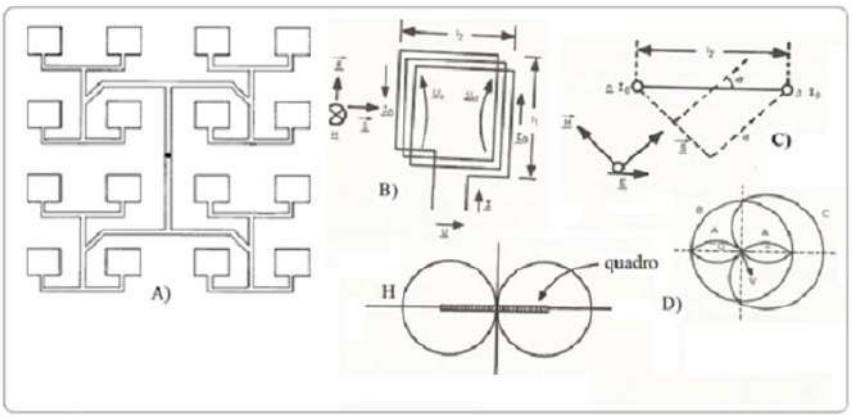

Fig. 3 – A) Conjunto de planares patch quatro por quatro alimentados pelo "ponto". B) Antena convencional de quadro. C) Polarização de antena de quadro. D) e E) Diagramas de Radiação da antena quadro e da antena goniométrica.

O procedimento para o projeto de uma antena **patch** de elemento simples está resumido nos pontos que se apresentam a seguir, [$Vaz,\ 2020$]:

1. Especificar:

Constante dielétrica do substrato, ε_r, os valores preferidos são $2{,}0 < \varepsilon_r < 6$.

Frequência central da operação, f_0.

Altura do substrato, h , deve ser compatível com a largura da linha alcançada e os níveis de impedância. Bancroft recomenda:

$h_{max} < \frac{0{,}3\ c}{2\ \pi f_0 \sqrt{\varepsilon_r}}$

Calcular a largura – W. Use:

Calcular a constante dielétrica efetiva,

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + W = \frac{c}{2\ f_0}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}} \qquad \frac{\varepsilon_r-1}{2} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{W}}} \quad \leftarrow \frac{h}{W} < 1.$$

2. Calcular a extensão do comprimento, ΔL.

3. $\Delta L = 0{,}412\ .\frac{(\varepsilon_{ef}+0{,}3)\left(\frac{W}{h}+0{,}264\right)}{(\varepsilon_{ef}-0{,}258)\left(\frac{W}{h}+0{,}80\right)}.h.$

4. Calcular o comprimento efetivo, L. $L_{ef} = L + 2\ \Delta L$. Temos de resolver a equação em ordem a L. Este é geralmente de meio-comprimento de onda no meio dielétrico efetivo.

6. Calcular a impedância de entrada à ressonância, R_{ent} : O inverso da admitância de entrada na fórmula que atribuímos a Merkel.

7. Use uma linha de transmissão de inserção ou de comprimento de um quarto de onda para a correspondência de impedância com a impedância de entrada desejada. Uma saída coaxial sob o substrato com condutor que se estende até ao ponto de inserção também pode ser apropriada ocasionalmente.

8. Calcular a diretividade.

$$D_1 = \left[\frac{2\ \pi\ W}{\lambda_0}\right]^2 .\frac{1}{I_1} \ \leftarrow\ I_1 = \int_0^{\pi}\left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2}.\cos\theta\right)}{cos\theta}\right]^{.2} .sin^3(\theta)\ d\theta \ \text{(1 ranhura.)}$$

$$D_1 = \left[\frac{2\ \pi\ W}{\lambda_0}\right]^2 .\frac{1}{I_2} \qquad \leftarrow \qquad I_2 = \int_0^{\pi}\int_0^{\pi}\left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2}.\cos\theta\right)}{cos\theta}\right]^{.2} .sin^3(\theta)\ .cos^2\left\{cos\left[\frac{k_0 L_{ef}}{2}\ .\sin(\theta).\sin(\emptyset)\right]\right\} d\theta d\emptyset.$$

9 → (2 Ranhuras) .

$$P_E(\theta,\emptyset) = cos\left[\frac{k_0 h}{\sqrt{\varepsilon_r}}.\cos(\theta)\right].\frac{sin\left[\frac{k_0 W}{2}.\sin(\theta).sin(\emptyset)\right]}{\frac{k_0 W}{2}.\sin(\theta).sin(\emptyset)}.\cos\left[\frac{k_0 L}{2}.\sin(\theta).\cos(\emptyset)\right].\cos(\emptyset) \wedge k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$P_H(\theta,\emptyset) = cos\left[\frac{k_0 h}{\sqrt{\varepsilon_r}}.\cos(\theta)\right].\frac{sin\left[\frac{k_0 W}{2}.\sin(\theta).sin(\emptyset)\right]}{\frac{k_0 W}{2}.\sin(\theta).sin(\emptyset)}.\cos\left[\frac{k_0 L}{2}.\sin(\theta).\cos(\emptyset)\right].\cos(\emptyset).\sin(\emptyset) \wedge k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

10. Simule o desenho da antena.
11. Fabrique a antena e compare os resultados medidos com os cálculos.

NOTAS IMPORTANTES: Podem calcular os integrais por esta fórmula dos dois níveis (Emanuel Vaz):

$Int \approx \frac{h}{4}.\left(E + 2I_p + 6I_{imp}\right)$ para n (número ímpar) de pontos.

Para o padrão de radiação no plano - E: ø = 0 e $-\pi/2 < \theta < \pi/2$

Para o padrão de radiação no plano – H

$$Y_{ent} = \frac{1}{120\,\pi^2}\left[1 - \frac{(k_0 h)^2}{24}\right] + \frac{1}{Z_0}\frac{\left[\frac{2\,\pi\,\Delta L\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{\lambda_0}\,tg\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}\right)\right]\left[\frac{Z_0}{120\,\pi^2}\left[1 - \frac{(k_0 h)^2}{24}\right]tg\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}L\right)\right]}{\left[1 - \frac{2\,\pi\Delta L\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{\lambda_0}\,tg\left[k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}L\right]\right]^2 + \left(\frac{1}{120\,\pi^2}\right)^2\left[1 - \frac{(k_0 h)^2}{24}\right]^2 Z_0^2 tg^2\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}L\right)}$$

$$\times \times\frac{1}{120\,\pi^2}\cdot\left[1 - \frac{(k_0 h)^2}{24}\right]\left[Z_0 - \frac{2\,\pi\Delta L\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{\lambda_0\,Z_0}\,Z_0^2\,tg\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}L\right)\right] +$$

$$+j\left\{\frac{2\,\pi\,\Delta L\,\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{\lambda_0\,Z_0}\right.$$

$$\left.+\,Z_0\,\frac{\left[\frac{2\pi\Delta L}{\lambda_0}+tg\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}L\right)\right]\left[1-\frac{2\pi\Delta L}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon_{ef}}tg\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}L\right)\right]-\left(\frac{1}{120\pi^2}\right)^2\left[1-\frac{(k_0h)^2}{24}\right]^2 Z_0^2 tg\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}L\right)}{\left[1-\frac{2\pi\Delta L\sqrt{\varepsilon_{ef}}}{\lambda_0}\,tg\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}L\right)\right]^2+\left(\frac{1}{120\pi^2}\right)^2\left[1-\frac{(k_oh)}{24}\right]^2 Z_0^2\,tg^2\left(k_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}L\right)}\right\}$$

(Fórmula da admitância)

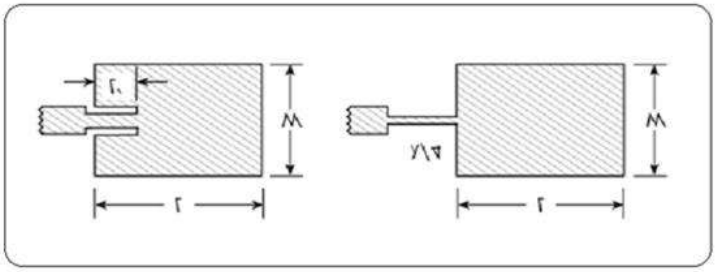

Fig. 4 – Técnicas de alimentação de duas antenas patch.

Além da influência do substrato dielétrico e do limite do ar, o impacto das franjas do campo elétrico nas bordas do condutor deve ser acomodado. O campo elétrico nas bordas dos condutores podem ser modelados com precisão por condensadores de elementos concentrados que aumentam efetivamente o comprimento elétrico do condutor em cada borda por um comprimento incremental, ΔL, :

ø = π / 2 e - π / 2 <θ <π / 2

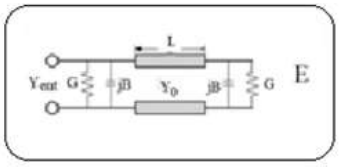

Fig. 5 -

Formação da microtira.

Preparação da Solução: Você pode preparar uma solução de óxido cuproso (Cu_2O) num solvente adequado. Uma abordagem comum é usar uma solução de nitrato de cobre ($Cu(NO_3)_2$) e reduzir com um agente redutor como a glicose.

Aplicação no Papel: Utilize um método de revestimento, como a imersão ou a pintura, para aplicar a solução de óxido cuproso sobre o papel. Certifique-se de que o papel esteja limpo e seco antes da aplicação.

Secagem: Deixe o papel revestido secar completamente. Isso pode ser feito ao ar livre ou em um forno a baixa temperatura para acelerar o processo.

Testes e Ajustes: Após a secagem, teste a condutividade da película de óxido cuproso. Se necessário, ajuste a concentração da solução ou o método de aplicação para obter a condutividade desejada.

A permissividade ronda os 8 ou 9 e a condutibilidade dos 10^{-3} a $10^{-1}\mathrm{S}/cm^2$

Para soldar óxido cuproso em fita num papel terminais da antena Pach com fios finos de cobre, seguem-se os seguintes passos:

Preparação do papel e da fita de óxido cuproso:

Certificar-se de que o papel está limpo e seco.

Aplicar a fita de óxido cuproso no papel em cartão, garantindo uma boa aderência se for caso disso.

Preparação do fio de cobre de ligações de saída:

Desencapar as extremidades dos fios de cobre finos.

Aplicar um pouco de fluxite de soldar nas extremidades desencapadas para molhorar a soldagem.

Soldagem:

Aquecer o ferro de solda a uma temperatura de cerca de $350℃$. Colocar a ponta do fessor de soldar na junção entre o fio de cobre e a fita de óxido cuproso.

Aplicar a solda na junção,permitindo que ela flua e crie uma ligação sólida entre o fio de cobre e a fita de óxido cuproso.

Remover o ferro de soldar e deixar a solda esfriar e solidificar.

Verificação:

Verificar a ligação para garantir que esteja firme e sem falhas.

Testar a continuidade elétrica com um multímetro para garantir que a ligação está a funcionar corretamente.

De acordo com as figuras 1 e 3 tem-se, com uma impedância quase nula dos fios de ligação, de calcular os parâmetros da antena em U modificado, mas que já vários tentaram e tiveram bons resultados considerando um meio de comprimento de onda para o comprimento efetivo da antena, em casos de tira sobre outros substratos que não o papel.

Os resultados dos cálculos de acordo com o mencionado:

Para a frequência de 834 MHz os resultados dos cálculos são os seguintes: $Z_{ent} = \frac{Z_0^2}{R_{ent}}$. Valores típicos: $R_{ent} = 200\Omega$ e $Z_{ent} = 50\ \Omega \Rightarrow\ Z_0 = \sqrt{R_{ent}.Z_{ent}} = \sqrt{200 \times 50} = 100\Omega$. $h = 0{,}0001$, $W = 3\ mm$, $\varepsilon_{ef} = 2{,}48$. Agora calculando como antena em U. $\Delta L = 4\ mm$, $L = 7{,}7\ cm$, para um dipolo de $\lambda/4$.

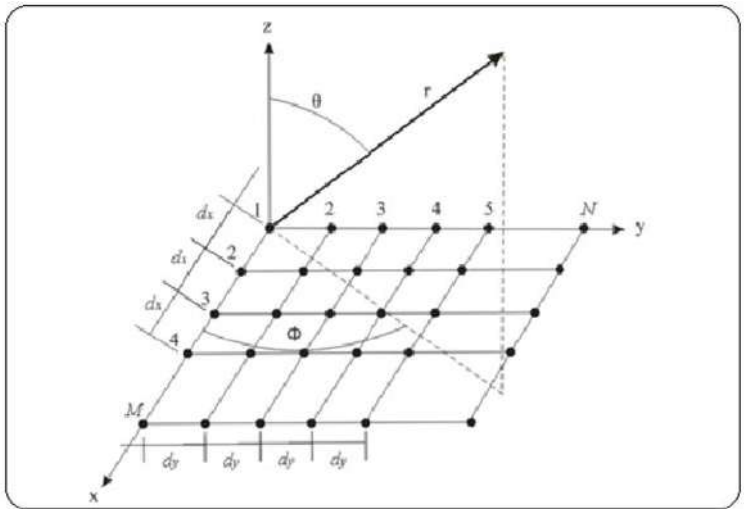

Fig. 6 –

Para executar o esquema da Fig. 3 A, temos de considerar antenas em U agrupadas e a fórmula geral do fator de arranjo campo é a seguinte, como se apresenta por exemplo na ref. 6.

No caso de isotropia temos para uma antena no arranjo $M \times N$ qualquer, Fig. 6:

$$AF_n(\theta, \emptyset) = \left\{\frac{1}{M}\frac{sen\frac{M\psi_x}{2}}{sen\frac{\psi_x}{2}}\right\} \times \left\{\frac{1}{N}\frac{sen\frac{N\psi_x}{2}}{sen\frac{\psi_x}{2}}\right\}$$

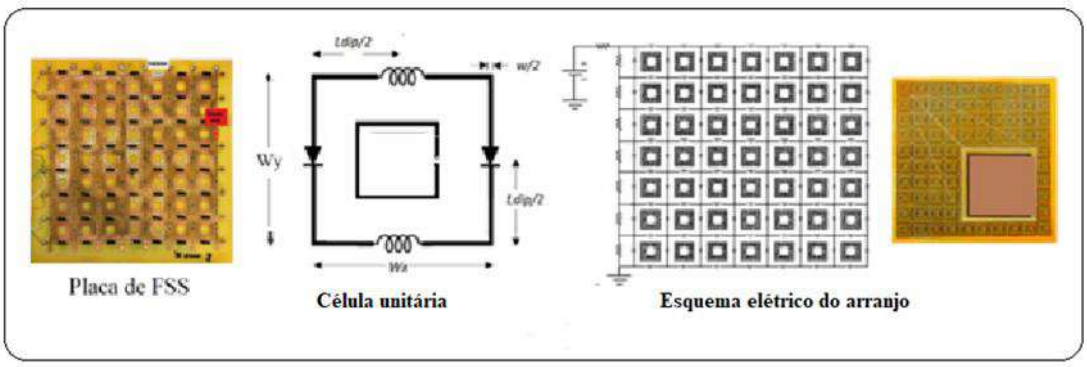

Fig. 7 –

O diodos PIN e as indutâncias servem para garantir outra adicional frequência de ressonância da antena de acordo com os dados para o comprimento efetivo. Os diodos Pin têm um circuito equivalente dado na figura daí que possamos usá-lo mesmo com um condensador feito de substratos de cobre oxidado. Pusemos à disposição dos leitores essa ideia que executámos noutro artigo. Apresenta-se também na Fig. 7 uma FSS com antenas em U.

Construção dos condensadores.

Definir os requisitos: Determine as especificações da antena patch, como a frequência de operação, a largura de banda e o tamanho físico.

Escolher os materiais: O cobre é uma boa escolha devido à sua alta condutividade. Certifique-se de que o cobre esteja adequadamente oxidado para melhorar a resistência à corrosão.

Calcular as dimensões: Use fórmulas específicas para calcular as dimensões do condensador e da antena patch. Por exemplo, a frequência de ressonância pode ser calculada usando a fórmula:

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}$$

onde (f_r) é a frequência de ressonância, (c) é a velocidade da luz, (L) é o comprimento da antena, e (ε_r) é a constante dielétrica do material.

Desenhar o layout: Utilize software de design assistido por computador (CAD) para desenhar o layout da antena e do condensador. Podemos também usar a data técnica dos diodos Pin e das indutâncias. A Fig. 8 mostra a data técnica que usámos e o formulário usado nestes problemas.

Fabricar e testar: Após a fabricação, teste-se a antena para garantir que ela atende às especificações desejadas.

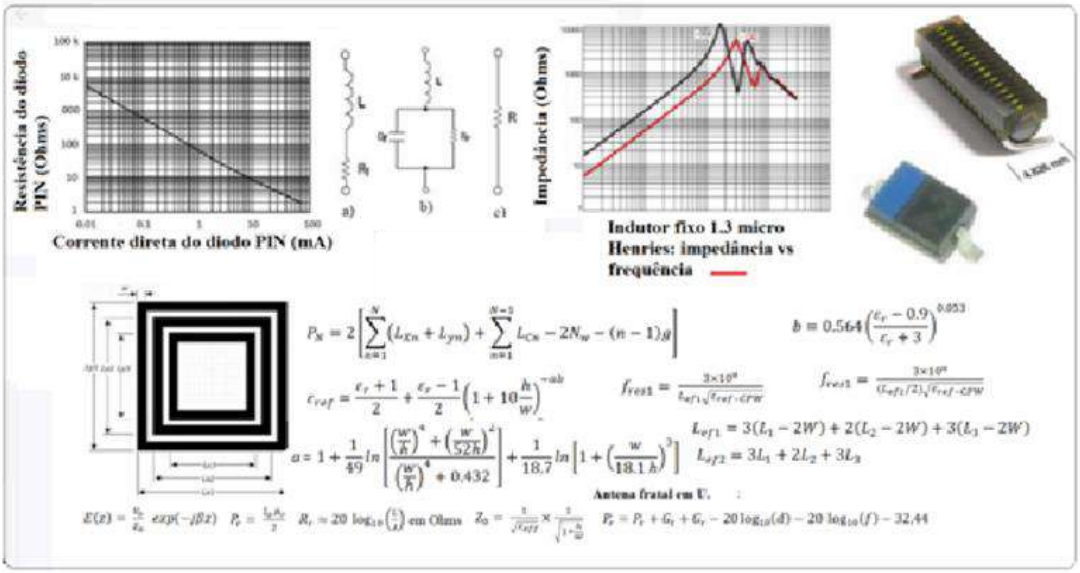

Fig. 8 -

Referências

[1]. Boast, W. B.,(1964).*Vector Fields, Harper Publishers*, Incorporated, Cap.24, New York.

[2]. William H. Hayt,(1983). *Eletromagnetismo*, Livros técnicos e científicos Editora, Jr, 3ª edição pág. 147.

[3]. Silvester P., (1968). *Modern Eletromagnetic Fields*, Cap 2 e Apêndice Prentice –Hall, Inc. Englewood Cliffs.

[4]. Fortunato, Elvira, (1998). *O transístor de papel*, Cenimat, UL. https://www.rtp.pt/noticias/pais/transistor-de-papel-a-descoberta-de-elvira-fortunato-que-ja-revoluciona-o-mundo_es971998

[5]. Vaz, Emanuel E. Pires, (1986). *Antenas Teoria e Prática*, Lopes da Silva Edit. Rua Chã, Porto.

[6]. Vaz, Emanuel E. Pires, (2020). *Sobre as antenas de microfita: um tutorial das lições aos alunos de engenharia*. QSP Abril.

[7]. Vaz, Emanuel E. Pires, *Antenas Propagação*, em preparação de publicação.