

ANTENAS EM GUIA DE ONDAS FENDIDO – INVESTIGAÇÃO PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Fábio Dias da Silva ¹; Thiago Antônio Grandi de Tolosa ²; Eduardo Victor dos Santos Pouzada ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professores da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

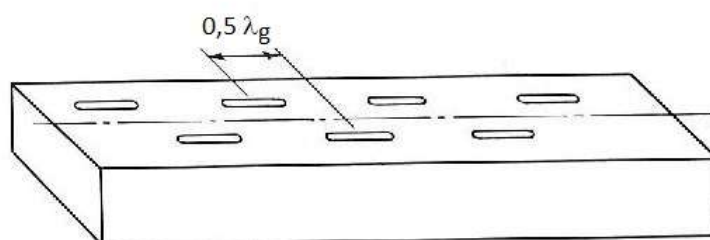
Resumo. *Este artigo aborda a investigação do uso de antenas com ranhura(s) construídas em guia de ondas de seção transversal retangular para aplicações industriais de alta potência. A faixa de frequência de operação é a do intervalo 2,40 a 2,50 GHz, correspondente às aplicações ISM – Industrial, Scientific, Medical and Domestic Applications – de uso permitido na faixa S do espectro de micro-ondas. O trabalho limitou-se ao estudo de antenas de ranhura única, o que serve, porém, como passo inicial para eventual futura extensão ao projeto de conjunto de antenas – antenna array – em configuração unidimensional ou bidimensional.*

As aplicações industriais de micro-ondas estabelecem naturalmente meios materiais dissipativos no entorno da antena, modificando severamente seus parâmetros eletromagnéticos, portanto o estudo abordou (1) a antena radiando no espaço livre e (2) radiando em meio dissipativo. O uso de simulação computacional foi necessário na etapa de otimização do projeto; ela foi realizada pelo software COMSOL Multiphysics.

Introdução

A terminologia inglesa *slotted waveguide antenna (SWA)* é tomada em língua portuguesa como “antena em guia de ondas fendido, sulcado ou ranhurado”. De fato, estas antenas pertencem à uma grande classe designada por “antenas de abertura” (Collin, 1985); pode-se dizer que elas representam uma dualidade com as antenas metálicas convencionais cujo modelamento teórico da radiação eletromagnética se dá a partir de uma distribuição de corrente admitida em sua estrutura. Desta forma, por causa da dualidade, o campo radiado por uma antena de abertura é calculado a partir de uma distribuição de campo admitida na região da abertura. A Figura 1 mostra um guia de ondas com ranhuras longitudinais. De fato, trata-se, neste caso, de um conjunto unidimensional de sete antenas numa estrutura de guia de ondas retangular

Figura 1 – Exemplo de guia de ondas com ranhuras longitudinais na parede maior. Adaptado de (Collin e Zucker, 1969).

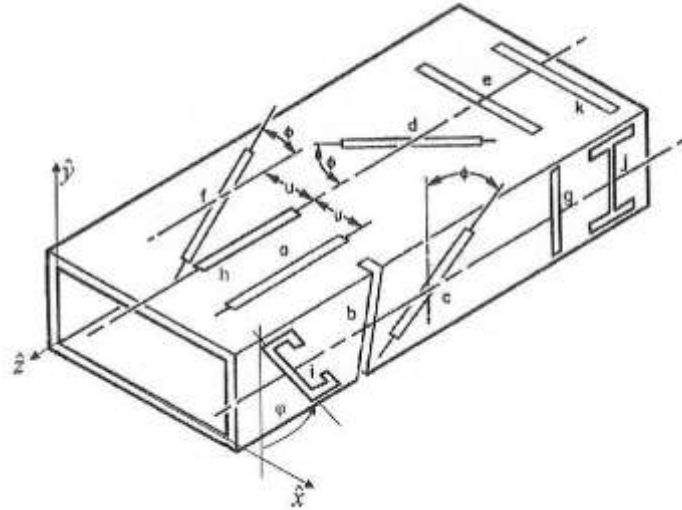


O mecanismo de radiação se dá pela interrupção das linhas de (densidade de) corrente elétrica J_s na superfície do guia retangular e é provocada pela presença de uma ou mais ranhuras em localizações estratégicas ao se retirar parte da parede metálica do guia por, por exemplo, um processo mecânico. Esta interrupção induz o aparecimento e concentração de cargas elétricas nas arestas mais longas das ranhuras com conseqüente formação de campo elétrico cuja linhas têm direção paralela às arestas de menor dimensão da ranhura.

A intensidade de radiação das ranhuras pode ser controlada; ela tende a valor máximo quando se força a abertura a operar próxima ao comprimento de ressonância ($L \cong \lambda_0/2$, se a radiação ocorrer no espaço livre) de modo semelhante (dual) ao de um dipolo linear de meio comprimento de onda.

As possibilidades de confecção de um ou mais sulcos (aberturas) em guias de onda são inúmeras (Volakis, 2007); cada uma delas tem vantagens e desvantagens inerentes. Havendo mais de um sulco do mesmo tipo em um único guia de ondas, tem-se uma configuração de um conjunto de antenas – *antenna array* – cuja característica principal buscada no projeto é a modificação do diagrama de radiação a partir de um único elemento radiador. A Figura 2 mostra as principais possibilidades.

Figura 2 – Antenas sulcadas em guia de ondas retangular. Adaptado de (Volakis, 2007).



As primeiras investigações deste tipo de antena remontam ao período da II Guerra Mundial (Stevenson, 1948). Inicialmente elas encontraram aplicação intensiva nas áreas aeroespacial e de radares (Bailey, 1967) e (Bailey, 1970). Atualmente a área de telecomunicações realiza intensa pesquisa no desenvolvimento da tecnologia 5G e, nela, as antenas de sulco são opção vantajosa de aplicação, seja pelo perfil baixo ou pela possibilidade de operação em multibanda de frequências que apresentam, entre outras características positivas (Sangster, 2019, capítulo 1).

Este trabalho procurou estudar e aplicar o conceito de antena de fenda, aplicada em guia de ondas retangular, em duas situações: (1) radiação no espaço livre e (2) radiação em meio com perdas. Por causa da integração entre a antena e o guia de ondas há a possibilidade de usá-la em altos níveis de potência tal como os empregados no Laboratório de Micro-ondas (LMO) do IMT.

Material e Métodos

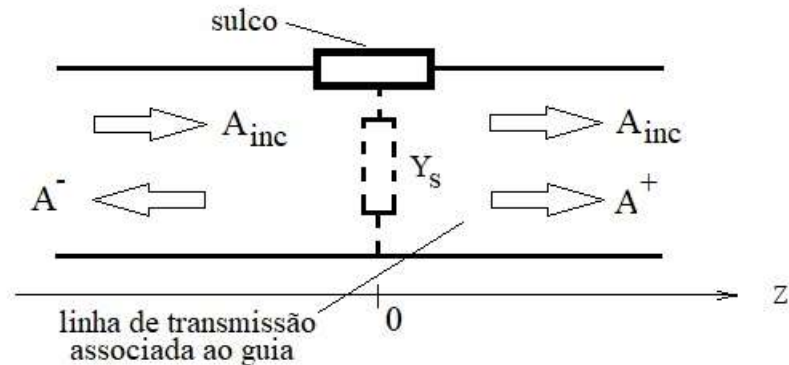
As antenas de sulcos são radiadores eletromagnéticos construídos com o auxílio de aberturas em estruturas estimuladas por campos eletromagnéticos. Nos casos deste trabalho o guia de ondas retangular é a estrutura que realiza o guiamento da energia até os sulcos que atuam como as antenas propriamente ditas.

Considerando a estrutura típica de um guia de ondas retangular (largura a , altura b) tal como mostrado da Figura 2, pode-se calcular a densidade de corrente superficial \mathbf{J}_s nas paredes do guia pela aplicação das condições de contorno e pelo conhecimento da configuração do campo eletromagnético a se propagar no seu interior. Para o caso do modo TE_{10} a densidade superficial de corrente na parede superior ($y = b$) é dada por (1) (Collin, 1985)

$$\mathbf{J}_s = e^{-j\beta z} \left(-jE_0 \frac{\pi Y_0}{k_0 a} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \hat{x} - E_0 Y_w \text{sen}\left(\frac{\pi x}{a}\right) \hat{z} \right) \quad (1)$$

em que E_0 é a amplitude do campo elétrico ($V \cdot m^{-1}$), Y_0 é a admitância intrínseca do meio material no interior do guia (S), k_0 é o número de onda ($rad \cdot m^{-1}$), a é a largura do guia (m) e Y_w é a admitância de onda (S). Para o caso de um sulco longitudinal aplicado ao guia, pode-se demonstrar (Josefsson e Rengarajan, 2018) que um modelo de circuito é dado pela admitância Y_S localizada na posição do sulco ($z = 0$) tal como mostrado na Figura 3, em que A_{inc} corresponde à onda incidente (antes da inserção do sulco) e A^+ e A^- correspondem às ondas espalhadas (*scattered waves*) pelo sulco e que se propagam, respectivamente, nas direções positivas e negativas de z . Este modelo pode ser aplicado no caso de um sulco retangular, suficientemente estreito segundo o eixo x e de comprimento L segundo o eixo z .

Figura 3 – Modelo de circuito associado a um sulco longitudinal.



O mecanismo de radiação do sulco estreito pode ser feito por analogia com o de um dipolo fino, ambos tendo o mesmo comprimento total L , bastando trocar os papéis de campo elétrico e de campo magnético; isto decorre de aplicação direta do teorema da dualidade (Balanis, 2012, capítulo 7). A potência radiada pelo sulco é representada pela potência dissipada na admitância do modelo. Interessa (muito) o caso do sulco apresentar ressonância, pois sua admitância será puramente real (uma condutância). Assim a potência radiada é dada por (2)

$$P_{rad} = \frac{1}{2} |V_0|^2 G_S \quad (2)$$

em que G_S é a condutância do sulco e V_0 é a tensão associada ao campo naquela posição. No caso da radiação ocorrer no espaço livre – ar, com impedância intrínseca $\eta_0 \cong 376,7$ (Ω) – o desenvolvimento das equações leva ao cálculo do valor da condutância normalizada do sulco, dada por (3)

$$g_S = \frac{G_S}{G_0} = 2,09 \frac{a \lambda_g}{b \lambda} \cos^2\left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_g}\right) \sin^2\left(\frac{\pi x_0}{a}\right) \quad (3)$$

em que G_0 corresponde à admitância característica da linha de transmissão, equivalente à admitância de onda do modo TE_{10} no guia considerado, λ é o comprimento de onda (m) no meio radiado, λ_g é o comprimento de onda guiado (m) e a e b são, respectivamente, a largura e a altura do guia (m); x_0 é o deslocamento do eixo do sulco em relação ao eixo longitudinal do guia. Observa-se que não haverá radiação se o sulco não apresentar um deslocamento em relação ao eixo central do guia; é este deslocamento que propicia controle sobre a intensidade de radiação para o caso de haver mais de um sulco, formando um conjunto de antenas.

Como o trecho final do guia é terminado em curto, o efeito da reflexão total precisa ser considerado (e diminuído ou minimizado), pois afetará o carregamento na região do sulco; isto se dá ao ajustar a distância entre o sulco e o final do guia para um valor igual a $\lambda_g/4$, ou seja transformando um curto-circuito em um circuito aberto.

Considerando o projeto de apenas um sulco num guia de ondas WR284 operando em 2,45 GHz resultam os valores indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores iniciais de projeto de um sulco em guia WR284 @ 2,45 GHz.

Parâmetro	Valor (mm)
Comprimento do sulco	61,18
Deslocamento axial	12,39
Distância entre o centro do sulco e o final do guia	57,75
Largura do sulco	8,74

Resultados e Discussão

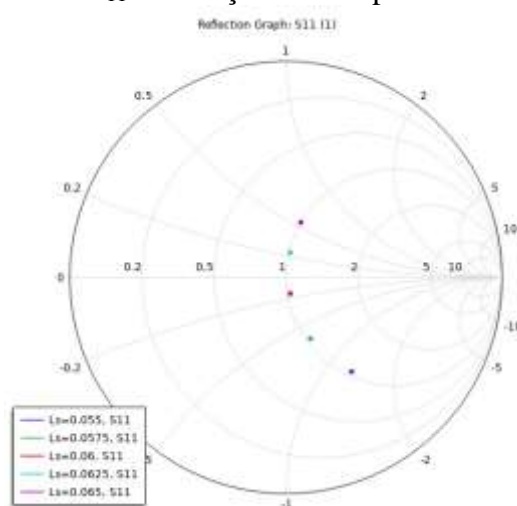
O comportamento da antena foi simulado com auxílio do *software* COMSOL Multiphysics, obtendo-se a perda de retorno e os diagramas de radiação (ainda que estes não fossem prioritários para este projeto). Os resultados da perda de retorno, equivalentes ao parâmetro de espalhamento S_{11} , estão mostrados na Tabela 2 para alguns valores na faixa ISM – *Industrial, Scientific, Medical Applications* – considerada.

Tabela 2 – Valores da perda de retorno em modelo inicial, simulado.

Frequência (GHz)	$ S_{11} $ (dB)
2,35	-17,1
2,40	-23,7
2,45	-29,4
2,50	-16,2
2,55	-11,2

Apesar do resultado indicar uma reflexão de potência de apenas 0,11% em 2,45 GHz há que se considerar (1) a precisão mecânica de construção da antena e (2) a necessidade de arredondamento dos cantos do sulco, decorrentes do uso de broca mecânica para sua realização. Por estas razões foi necessário contemplar modificações na geometria original que não podem ser atendidas por modelagem analítica; isto levou, evidentemente ao estudo da sensibilidade da variação dos seguintes parâmetros: deslocamento axial do sulco, distância entre o sulco e o final do guia, comprimento do sulco e também a sua largura. Verificou-se inicialmente o efeito individual de cada parâmetro. A Figura 4 mostra, por exemplo, os resultados da modificação do comprimento do sulco nos valores complexos de S_{11} ; a trajetória, passando pelo centro da carta de Smith, indica a proximidade de situação ótima.

Figura 4 – Resultados de S_{11} em função do comprimento do sulco ($f = 2,45$ GHz).



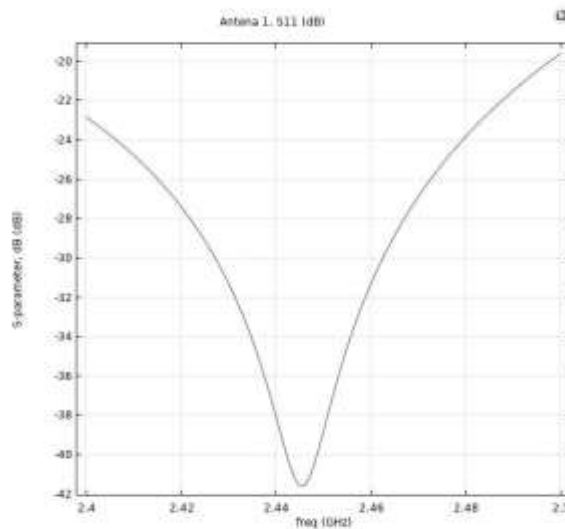
Por fim, e a partir de valores “quase ótimos”, realizou-se otimização computacional de todos os parâmetros. Os valores finais de projeto estão mostrados na Tabela 3; a Figura 5 mostra o resultado da curva da perda de retorno em função de frequência; o valor de $|S_{11}|$ baixou satisfatoriamente para $-38,9$ dB.

Tabela 3 – Valores finais de projeto de um sulco arredondado em guia WR284 @ 2,45 GHz.

Parâmetro	Valor
Comprimento do sulco	61,18 mm
Deslocamento axial	12,39 mm
Distância entre o centro do sulco e o final do guia	57,75 mm
Largura do sulco	10,87 mm

Observa-se que o único parâmetro que efetivamente contribuiu na otimização foi a largura do sulco.

Figura 5 – Antena otimizada: perda de retorno na faixa 2,40 a 2,50 GHz.



Um protótipo foi construído em oficina mecânica com ferramentaria capaz de atender precisão de décimos de milímetro. A Figura 6 mostra a imagem deste protótipo.

Figura 6 –Imagem da antena de um sulco em guia WR284.



A Figura 7 mostra o resultado da perda de retorno medida em situação real. A medição resulta em valores de perda de retorno próxima a -17 dB no centro da faixa, equivalente a uma reflexão de potência da ordem de 2%, um valor bastante bom, mesmo considerando que, na medição, é necessário o uso de uma transição entre o terminal coaxial (que conecta o cabo ao analisador vetorial de redes, VNA – *Vector Network Analyzer*) e o trecho inicial de um guia de ondas (conectado à antena de sulco). A faixa de frequências usada na medição foi propositalmente aumentada (2,0 a 3,0 GHz) a fim de verificar o efeito da frequência de corte do modo TE_{10} no guia WR284; o valor teórico é 2,078 GHz, indicado pelo marcador no gráfico, e claramente associado ao início da propagação visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Perda de retorno do conjunto adaptador coaxial-guia e antena de sulco na faixa.

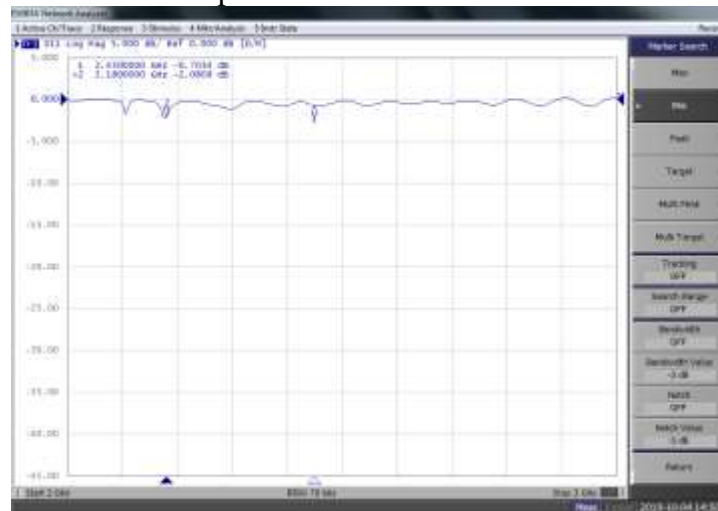


Como a medição da antena se dá nos baixos níveis de potência do VNA, pode-se verificar com segurança a influência de objetos próximos a ela. Utilizou-se placas metálicas com arestas de aproximadamente 20 cm; os efeitos foram facilmente constatados em distâncias de aproximadamente um metro. Isto indica que, mesmo não sendo possível a medição do diagrama de radiação, por limitação técnica da instrumentação disponível, a antena opera adequadamente e poderá ser usada com níveis de potência elevada.

O objetivo inicial deste trabalho contemplava o projeto de uma segunda antena para radiação em meios com perdas. Tornava-se obrigatório o uso de material sólido a impedir o contato direto entre o interior do guia, do sulco e o meio material externo à antena. Este material sólido serviria como “vedação” da antena. Considerando que a intensidade de radiação de potência decai segundo o quadrado da distância na região de Fraunhofer (campo distante) (Collin, 1985), é evidente que o meio material usado para a vedação terá influência significativa no comportamento da antena. Este meio isolante deverá ter poucas perdas. Um teste simples foi realizado colocando-se uma placa de Teflon (espessura igual a 11 mm) suficientemente grande para cobrir, com folga, o sulco da antena da Figura 6. O resultado está mostrado na Figura 8; a deterioração do desempenho é evidente, ainda que não se trate de antena projetada para tal fim.

A busca por artigos científicos sobre o estudo de radiação de aberturas cobertas com camadas de vários meios materiais com perdas mostrou-se tarefa muito além da dificuldade de um trabalho de iniciação científica de graduação (Yoshitomi, 2001) (Jin *et al.*, 2012) (Casula e Montisci, 2009) (Casula e Mazzarella, 2004) (Katehi, 1990). Estas limitações interromperam o prosseguimento deste trabalho. Algumas configurações de antenas com ranhuras só podem ser eficientemente projetadas com auxílio de simuladores computacionais (Sangster, 2019, p. 17); ainda assim, a abordagem teórica não pode ser desconsiderada.

Figura 8 – Resultado da perda de retorno com placa de Teflon colocada sobre o sulco da primeira antena.



Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo da aplicação de uma antena de sulco em guia de ondas retangular para aplicações em alta potência na faixa de frequências entre 2,40 a 2,50 GHz. O projeto inicial foi realizado a partir de resultados modelos teóricos. A sensibilidade dos parâmetros de projeto foi verificada com o uso de simulador computacional (COMSOL Multiphysics), aplicando-se o Método dos Elementos Finitos. O passo final foi a otimização da antena a partir do ajuste simultâneo de todos os parâmetros; o resultado mostrou a importância e o efeito de cada um deles.

O protótipo da antena com uma ranhura funcionou bem, de acordo com o projeto, servindo para radiação de alta potência no espaço livre.

O projeto de antena para uso em meio eletromagneticamente dispersivo demanda significativa complexidade teórica, mesmo para geometrias relativamente simples. Estes modelamentos precisarão ser melhor estudados antes de se usar cegamente qualquer simulação computacional e deixam espaço para futuros trabalhos.

Referências Bibliográficas

- Bailey, M.C. (1967) Design of Dielectric-Covered Resonant Slots in a Rectangular Waveguide. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **15**(5), 594-598.
- Bailey, M.C. (1970) The Impedance Properties of Dielectric-Covered Narrow Radiating Slots in the Broad Face of a Rectangular Waveguide. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **18**(5), 596-603.
- Balanis, C.A. (2012) *Advanced Engineering Electromagnetics*. 2nd edition. Hoboken, NJ, John Wiley.
- Casula, G.A.; Mazzarella, G. (2004) A direct computation of the Frequency Response of Planar Waveguide Slot Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **52**(7), 1909-1912.
- Casula, G.A.; Montisci, G. (2009) Design of Dielectric-Covered Planar Arrays of Longitudinal Slots. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **8**, 752-755.
- Collin, R.E.; Zucker, F.J. (eds.) (1969) *Antenna Theory – part I*. New York, McGraw-Hill.
- Collin, R.E. (1985) *Antennas and Radiowave Propagation*. New York, McGraw-Hill.
- Jin, Z. et al. (2012) Effect of a Multilayer Dielectric Cover on the Behavior of Waveguide Longitudinal Slots. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **11**, 1190-1193.
- Josefsson, L.; Rengarajan S.R. (2018) *Slotted Waveguide Array Antennas*. London, Scitech Publishing.

- Katehi, P.B. (1990) Dielectric-Covered Waveguide Longitudinal Slots with Finite Wall Thickness. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **38**(7), 1039-1045.
- Sangster, A.J. (2019) *Compact Slot Array Antennas for Wireless Communications*. Cham, Switzerland, Springer Nature.
- Stevenson, A.F. (1948) Theory of slots in rectangular waveguides. *Journal of Applied Physics*, **19**(1), 24-38.
- Volakis, J.L. (2007) *Antenna Engineering Handbook*. 4th edition. New York, McGraw-Hill.
- Yoshitomi, K. (2001) Radiation from a Slot in an Impedance Surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **49**(10), 1370-1376.