

Acoplamento de Modos Guiados em Sistemas TDSL Utilizando Antenas com Simetria Radial

B. P. T. Sousa, D. D. Souza, G. S. Borges, R. M. Rodrigues, A. M. Cavalcante e J. C. W. A. Costa

Resumo—Recentemente, a exploração de pares trançados utilizados como guia de ondas, como alternativa ao modo de linhas de transmissão, tem ganhado destaque, principalmente com o objetivo de suprir as altas demandas de dados. Um dos desafios para esta implementação é o acoplamento dos modos guiados no par trançado, nesse contexto, este artigo visa investigar o acoplamento de sinais nessas estruturas utilizando antenas com propagação radial. Os resultados foram obtidos por meio de simulações numéricas, em termos do parâmetro de espalhamento da antena e da intensidade de campo elétrico no par, demonstrando uma eficiência do acoplamento de 27,12% em 0,3 THz.

Palavras-Chave—Acoplamento de modos guiados, antenas, Terabit DSL, par trançado.

Abstract—Recently, the exploitation of twisted pairs used as waveguide, as an alternative to the transmission lines mode, has gained prominence, mainly in order to reach the high demands of data. One of the challenges for this implementation is the coupling of the guided modes in the twisted pair, in this context, this paper aims to investigate the coupling of signals in these structures using antennas with radial propagation. The results were obtained by numerical simulations, in terms of the antenna scattering parameter and the electric field strength in the pair, demonstrating a coupling efficiency of 27.12% in 0.3 THz.

Keywords—Coupling of guided modes, antennas, Terabit DSL, twisted pair.

I. INTRODUÇÃO

Uma das fundamentais motivações para a investigação e criação de novos padrões de transmissão e tecnologias de acesso tem sido a necessidade de suprir altas taxas de dados [1]. Dessa forma, o sistema DSL (*Digital Subscriber Line*), que ainda utiliza pares trançados para a transmissão dos sinais, vem sendo ajustado para conseguir atender essa crescente demanda de dados.

Os pares trançados, assim como todos os meios físicos de propagação nos sistemas DSL, são utilizados como linha de transmissão, utilizando o modo transversal eletromagnético (TEM). Entretanto, as limitações físicas do par trançado como linha de transmissão impedem que o sistema alcance velocidades na faixa de Terabit por segundo [2]. Dessa forma, a exploração de modos superiores nessas estruturas já é objeto de estudo e traz consigo a possibilidade de aumentar ainda mais a taxa de dados nessa infraestrutura disponível.

O guiamento de ondas em estruturas mais simples como é o caso do guia de onda de Sommerfeld, constituído por

um condutor cilíndrico imerso no ar, e o de Goubau, que é um condutor cilíndrico envolvido por um dielétrico, já foram bem estudados e tem comportamento eletromagnético bem definido [3]. No entanto, em [2] é introduzido o conceito do Terabit DSL (TDSL), que propõe que os pares trançados também sejam utilizados como guia de ondas, propagando ondas eletromagnéticas próximas e entre os fios.

Assim, considerando que na estrutura dos pares trançados existem pequenos espaços, ao redor e entre os pares dentro do cabo em dimensões milimétricas ou menores, o transporte de sinais de comprimento de onda correspondentes a faixa terahertz (THz) e quase infravermelhos, de 50 GHz a 1 THz, podem ser suportados. Esses sinais, diferente do que acontece quando utilizados como linhas de transmissão, seriam transportados nos modos transversal elétrico (TE) e transversal magnético (TM) ao longo do condutor [2].

Apesar do grande potencial para transportar o sinal na faixa próxima de terahertz (THz) ao longo de sua superfície com baixa atenuação e dispersão desprezível, ainda existem limitações práticas para o uso de cabos metálicos como guia de onda, até mesmo para as estruturas mais simples, como o fato de a onda eletromagnética de superfície ser radialmente polarizada, dificultando o acoplamento com a fonte de onda eletromagnética, que é polarizada linearmente.

A dificuldade do acoplamento de uma fonte polarizada linearmente em estruturas radiais é devido a fraca sobreposição espacial do modo guiado que é radialmente polarizado [4], dessa forma, na literatura, há alternativas para facilitar o acoplamento em estruturas radiais simples, utilizando antenas com polarização radial, como em [5], ou utilizando métodos de acoplamento que aumentem a eficiência entre a antena e o guia de onda.

Portanto, levando em consideração a viabilidade do guiamento de ondas em pares trançados e as limitações do acoplamento do sinal em estruturas radiais, este artigo tem como objetivo avaliar um cenário de acoplamento entre essa estrutura uma antena fotocondutiva com polarização radial. Para essa avaliação é utilizado um método eficaz de acoplamento e o par trançado como guia de onda, analisando a melhor estrutura da antena para a transmissão no contexto TDSL, assim como a eficiência do acoplamento do sinal no par trançado.

O restante deste artigo está organizado em quatro seções. A Seção II aborda os aspectos teóricos em relação aos métodos de acoplamento no condutor como guia de ondas. A Seção III mostra a metodologia utilizada nas simulações da antena e do par trançado como guia de ondas acoplado ao cenário. A Seção IV apresenta a análise dos resultados, verificando parâmetros da antena, o método de acoplamento e o cálculo da eficiência de acoplamento entre a antena e o par trançado. Por fim, a Seção V mostra as conclusões.

Brenda Sousa¹, Daynara Souza¹, Gilvan Borges², Roberto Rodrigues¹, André Cavalcante³ e João Costa¹, ¹Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brasil. ² Instituto Federal do Pará, Belém-PA. ³Ericsson Telecomunicações S.A., Indaiatuba-SP. E-mails: brenda.ppenedo@gmail.com, daynara.souza@itec.ufpa.br. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Ericsson Telecomunicações S.A.

II. MÉTODOS DE ACOPLAMENTO

Considerando a grande falta de correspondência entre o modo de propagação da onda irradiada e o guia de onda, devido a dificuldade do acoplamento das ondas eletromagnéticas em superfícies radiais, como nos guias de onda de Sommerfeld, Goubau e consequentemente no par trançado, a inserção das ondas nesses guias necessitam de técnicas para aumentar a eficiência de acoplamento [4].

Dessa forma, além da utilização de antenas com polarização mais adequada para guias radiais, algumas soluções de polarizadores são encontradas na literatura para acoplamento de sinais em guias de ondas de fio único, com objetivo de melhorar o coeficiente de acoplamento [6]. Alguns desses métodos de acoplamento estão listados:

- *Scattering in-couple*: nesse método, pulsos THz polarizados horizontalmente são gerados por um transmissor fotocondutor de fibra acoplada e focalizados em um guia de ondas de aço inoxidável. Um segundo fio de aço inoxidável atua como um acoplador de entrada. Assim, um modo radialmente polarizado é excitado no espaço ao redor do guia de onda [7];
- *Mode filters*: este método consiste em utilizar uma placa de fase diferencial que induz uma inversão de polarização em comparação ao campo eletromagnético lançado antes no fio [8];
- *Plasmonic in-couplers*: este método envolve a inserção da extremidade de um fio de metal afunilado no centro de uma abertura circular menor que o comprimento de onda, fabricada em uma folha metálica planar autônoma. A abertura do menor comprimento de onda é cercada por sulcos anulares concêntricos [9];
- *Lens focusing*: este método consiste em focalizar diretamente um feixe de onda cilíndrico THz de banda larga com lentes convencionais [4].

A eficiência de acoplamento alcançada apresenta valores bastante variados entre os métodos, resumidos na Tabela I.

TABELA I. EFICIÊNCIA DE ACOPLAMENTO PARA CADA MÉTODO.

Método	Eficiência
<i>Scattering in-couple</i>	0,50%
<i>Mode filters</i>	50%
<i>Plasmonic in-couplers</i>	Não especificada
<i>Lens focusing</i>	66,30%

Apesar dos cenários utilizados nos métodos de acoplamento não serem idênticos, todos eles utilizam estruturas radiais como guia de ondas. Dessa forma, entre os métodos listados o *lens focusing* atinge o melhor desempenho, atingindo a eficiência máxima de 66,3% com média de 16,8% entre 0,1 THz e 0,5 THz para o cenário descrito em [4]. Assim, apesar da utilização de uma estrutura mais complexa que os guias de ondas imersos no ar, este artigo avalia o acoplamento no par trançado utilizando o método de acoplamento *lens focusing*.

III. METODOLOGIA

O cenário de simulação foi construído utilizando o *software* HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), que utiliza o

método dos elementos finitos para soluções computacionais precisas e eficientes para projetos e análises eletromagnéticas.

Utilizando essa ferramenta, a montagem do cenário 3D foi organizada e simulada em 3 partes: a construção da antena, anexação da antena à lente acopladora e substrato e, por fim, a montagem do cabo como guia de onda, como descritas nas seções a seguir.

A. Antena

A antena utilizada se baseou em um modelo de antena fotocondutiva proposta em [5]. Diferente das antenas fotocondutivas mais utilizadas, a antena proposta utiliza uma simetria cilíndrica para gerar uma propagação radial.

Segundo o modelo proposto, a estrutura da antena real seria composta por dois eletrodos, um interno e outro externo, sendo excitada por uma haste que atravessa o eletrodo externo e chega ao centro do eletrodo interno, como ilustrada na Figura 1a.

Para efeitos de simulação, uma antena ideal foi construída, desconsiderando os efeitos da haste de alimentação, de acordo com a Figura 1b. Com essa modificação a excitação da antena foi feita diretamente no eletrodo interno. No HFSS essa excitação foi realizada utilizando uma *lumped port*, que excita a região entre os eletrodos, com direção de polarização do eletrodo externo para o interno, para uma faixa de frequência de 0,1 a 1 Terahertz.

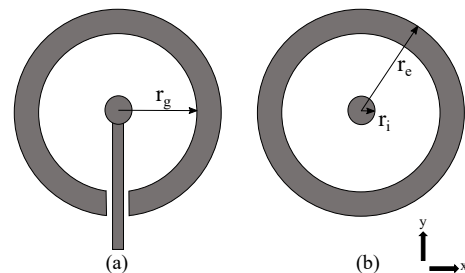


Figura 1. Modelo da antena fotocondutiva proposta em [5]. (a) Modelo real com haste de alimentação. (b) Modelo ideal utilizado para simulação.

Dessa forma, a antena ideal foi construída no HFSS de acordo com as dimensões descritas em [5], mostradas na Tabela 2. Para simplificar o modelo simulado, toda a estrutura da antena foi construída utilizando PEC (*Perfect electric conductor*) e a simulação foi realizada colocando a antena em um meio com constante dielétrica de aproximadamente 1, correspondente ao espaço livre.

TABELA II. PARÂMETROS DA ANTENA ORIGINAL SIMULADA.

Parâmetros	Valores[μm]
Raio do eletrodo interno (r_i)	2,5
Raio do gap (r_g)	102,5
Raio do eletrodo externo (r_e)	112,5
Espessura da estrutura (e)	0,035

Após a simulação no *software* HFSS, foram extraídos alguns dados de interesse para análise do desempenho da antena utilizada. Entre esses dados, foram extraídos: o parâmetro S_{11} , que nos disponibiliza a frequência de ressonância da antena; a distribuição do campo na frequência de operação; e, ainda,

o diagrama de radiação, o qual nos permite analisar a direção de maior radiação.

B. Lente acopladora e substrato

Considerando o campo radiado pela antena e com objetivo de direcionar o campo para o cabo, a antena construída foi colocada entre duas interfaces. Como esquematizado na Figura 2, a antena está disposta no plano x-y entre o substrato e a lente acopladora.

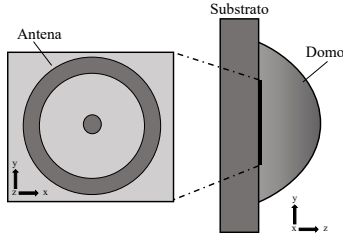


Figura 2. Esquemático de representação da antena acoplada ao substrato e a lente acopladora.

O substrato consiste em um meio com constante dielétrica equivalente a 13, que é aproximadamente igual ao material Arseneto de Gálio (AsGa), com espessura de $500 \mu\text{m}$. A lente acopladora é representada por um domo esférico de silício de raio $2000 \mu\text{m}$, colocado do outro lado da antena para acoplar o feixe ao cabo. As dimensões dessas estruturas estão de acordo com [5].

C. Cenário de simulação com par trançado

O cenário de simulação completo é composto pelas estruturas descritas nas seções anteriores mais a estrutura de um par trançado acoplado no domo de silício, como esquematizado na Figura 3. A localização do par trançado no cenário foi definida a partir das simulações realizadas, e prévias análises da direção de radiação da estrutura com o domo e da intensidade do campo elétrico radiado.

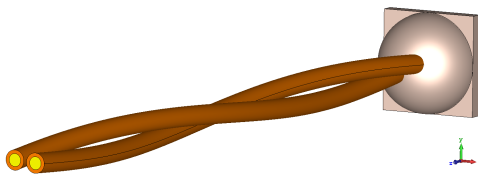


Figura 3. Cenário de simulação completo.

O cabo utilizado para simulação foi um par trançado com características de acordo com os padrões categoria 5 melhorada (CAT 5e - *Enhanced Category 5*), com as dimensões descritas na Tabela III baseados na seção transversal do par, como é mostrado na Figura 4.

Neste cenário com a antena ideal gerando os campos radiais, o par trançado tem como objetivo servir como guia de onda para a propagação das ondas. Devido às limitações computacionais, o par trançado utilizado nas simulações tem um comprimento de $12,63 \text{ mm}$, o qual representa, aproximadamente, o comprimento de um trançamento.

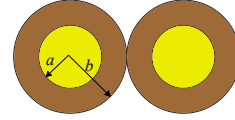


Figura 4. Seção transversal do par trançado.

TABELA III. PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO PAR TRANÇADO.

Parâmetros	Valor [mm]	Material associado
Raio do condutor (a)	0,255	Cobre
Raio do isolante (b)	0,4	Polietileno
Comprimento do trançado	12,63	-x-

Com o cenário de simulação completo, como mostrado na Figura 4, a simulação pode ser realizada na faixa de frequência de operação da antena, anteriormente mencionada. Porém, para avaliar o acoplamento no cabo os resultados a seguir foram todos em termos da frequência de ressonância da antena, a qual seria a frequência de melhor radiação do campo na estrutura.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A. Operação da Antena

O modelo da antena, como mencionado anteriormente, foi baseado no artigo [5], porém a antena foi simulada variando alguns parâmetros para o funcionamento de acordo com o sistema Terabit DSL e de acordo com o método de acoplamento escolhido, que atinge melhores resultados entre 0,1 a 0,5 THz [4]. Portanto, a antena é projetada pra uma frequência intermediária de 0,3 THz.

Dessa forma, para o ajuste de frequência de ressonância e melhoria do tamanho da faixa de operação foram realizadas simulações variando os parâmetros abaixo:

- Variação das dimensões da estrutura proporcionalmente;
- Variação da impedância da porta;

Foi realizada primeiramente a variação da dimensão da antena, partindo das dimensões propostas do artigo base, descritas na Tabela II. Portanto, a variação foi feita a partir da multiplicação de todas as dimensões por uma constante k .

Como pode ser visto na Figura 5, a variação desse parâmetro trouxe consequências na faixa de operação da antena, ou seja, quanto maior o k mais baixas são as frequências de operação, como esperado do comportamento das antenas.

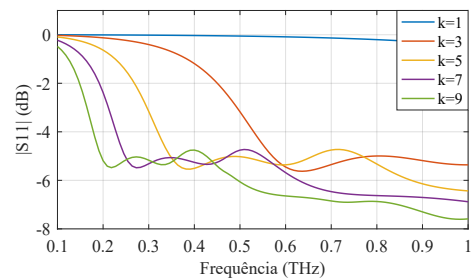


Figura 5. Variação da dimensão da antena mantendo a proporção.

De acordo com a variação realizada, a constante que deixou a estrutura mais adequada para a faixa de operação desejada foi quando k assumiu o valor igual a 7. Dessa forma, para as demais análises do acoplamento, as dimensões da antena foram definidas de acordo com os melhores resultados obtidos,

sendo elas: o raio do eletrodo interno com 17,5 μm ; o raio do gap com 717,5 μm ; e o raio do eletrodo externo com 787,5 μm .

Partindo dessa consideração, a variação da impedância foi realizada para ajustar o nível do parâmetro de espalhamento (S_{11}), a um nível menor que -10 dB, definido como sendo o nível mínimo para propagação [10].

Na Figura 6, é possível notar que a variação de impedância não altera consideravelmente a faixa de frequência de operação, e sim o nível do S_{11} , portanto, à medida que esse parâmetro foi sendo alterado a curva foi ficando abaixo de -10 dB na frequência de operação desejada. A partir de um determinado valor, é possível notar que o S_{11} começou a voltar para níveis superiores a -10 dB, como aconteceu com a curva de 200 Ohms. Dessa forma, pode-se admitir que o valor anterior de 150 Ohms é o mais adequado, ou seja, o mais casado com a estrutura da antena.

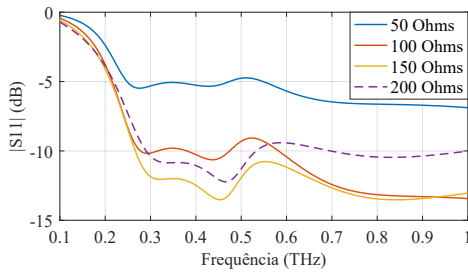


Figura 6. Variação da impedância de acordo com a dimensão adequada da antena.

A partir da antena ajustada para o cenário Terabit DSL, com frequência de operação em 0,3 THz, é possível analisar as regiões do campo eletromagnético ao redor da antena transmissora (*Farfield*) e o diagrama de radiação no plano y-z, presente na Figura 7.

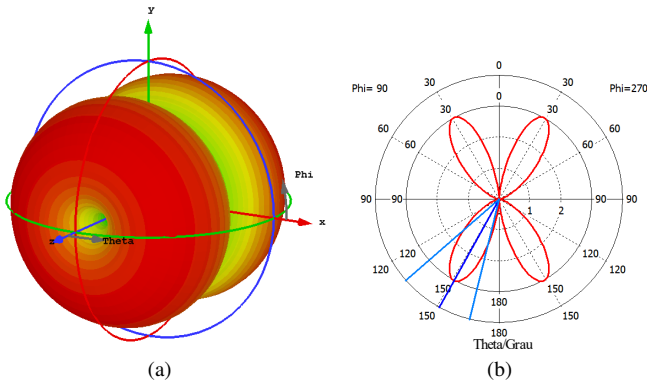


Figura 7. (a) *Farfield* da antena simulada em 0,3 THz. (b) Padrão de radiação da antena com polarização radial em 0,3 THz no plano y-z.

Como pode ser visto na Figura 7a, considerando que a antena ideal está no plano x-y, a polarização radial da radiação gerada é confirmada pela presença do modo “*donut*” propagando-se ao longo do eixo z. A antena simulada apresenta simetria cilíndrica, isso pode ser visto na medida em que o padrão de radiação é simétrico em relação ao eixo z, como mostra o *Farfield*.

O diagrama de radiação mostrado na Figura 7b, pode ser comparado ao padrão de radiação da antena proposta em

[11], mostrando que apesar da mudança em alguns parâmetros da antena o padrão de radiação não é alterado. O diagrama também mostra a direção de radiação no plano y-z, a eficiência de radiação e outros parâmetros característicos da antena, como mostrados na Tabela IV, todos para a frequência de 0,3 THz.

TABELA IV. RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DA ANTENA.

Parâmetros f=0,3 THz	Valores
Magnitude do lóbulo principal	4,78 dBi
Largura angular (3dB) no plano x-z	35,2 deg.
Largura angular (3dB) no plano y-z	35,2 deg.
Eficiência de radiação	99%

B. Análise do acoplamento no par trançado

Como mostrado na Figura 3, o cenário completo é formado pela antena, substrato, domo e par trançado acoplado à estrutura. Portanto, foram feitas avaliações para determinar qual a melhor posição do par trançado em relação a estrutura já montada.

Assim, para posicionar a seção inicial do centro do par trançado, foram determinadas três posições variando no eixo z. A primeira posição foi em 0,1 mm, bem próxima da antena, a segunda foi escolhida para ser uma região intermediária localizada dentro do domo, em 1 mm, e a última posição foi em 2 mm, a qual está bem na saída do domo.

A medição do campo elétrico (E) foi feita em relação ao eixo z para avaliar tanto o acoplamento no par trançado quanto o guiamento na estrutura. Essa análise foi feita considerando desde a seção de acoplamento do par trançado (Pi) até o comprimento final do par (Pf), o resultado pode ser avaliado na Tabela V.

TABELA V. NÍVEL DO CAMPO ELÉTRICO NO INÍCIO E FINAL DO PAR TRANÇADO.

Posição	Magnitude do E em Pi V/m	Magnitude do E em Pf V/m
Com Par		
z = 0,1 mm	6672	218,5
z = 1 mm	2756	1339
z = 2 mm	3274	1901

A partir dessa avaliação, podemos perceber que apesar dos níveis estarem próximos, a situação que tem melhor desempenho é quando o cabo está localizado em 2 mm (saída do domo), garantindo intensidades de campo de 3274 V/m em Pi e 1901 V/m em Pf, demonstrando que além do sinal acoplar de forma eficaz nessa posição ele é melhor guiado ao redor da estrutura.

Além dessa análise, é de interesse avaliar se o comportamento do campo está realmente sendo modificado pelo par trançado, ou se o comportamento permanece o mesmo caso o meio fosse somente ar. Dessa forma, foi feita uma análise da magnitude do campo na seção Pi e na seção Pf e então comparado com a magnitude do campo nas mesmas posições sem o cabo acoplado. Para a medição da magnitude na seção transversal do par trançado foi realizado uma varredura entre as posições -1 a 1 no eixo x, posições com raio maior que o raio do par. Os resultados são mostrados na Figura 8.

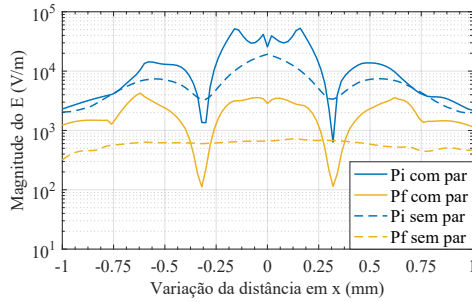


Figura 8. Comparação entre a magnitude do campo nas seções iniciais (Pi) e finais (Pf) com o par trançado e sem o par trançado.

De acordo com os resultados da Figura 8, é possível analisar que as curvas de Pi tem aproximadamente o mesmo nível e comportamento, o que é coerente, uma vez que representam o sinal entregue pela antena independente de ter ou não um cabo para acoplar esse sinal. Já para as curvas de Pf, o nível de sinal com o cabo é visivelmente maior que sem o cabo, o que indica acoplamento e guiamento no par trançado.

Dessa forma, é possível afirmar que a presença do par trançado no cenário de simulação faz com que o campo radiado pela antena se concentre entorno da estrutura do par, enquanto que o cenário de simulação sem o par trançado faz com que o campo se disperse, como pode ser observado na Figura 9.

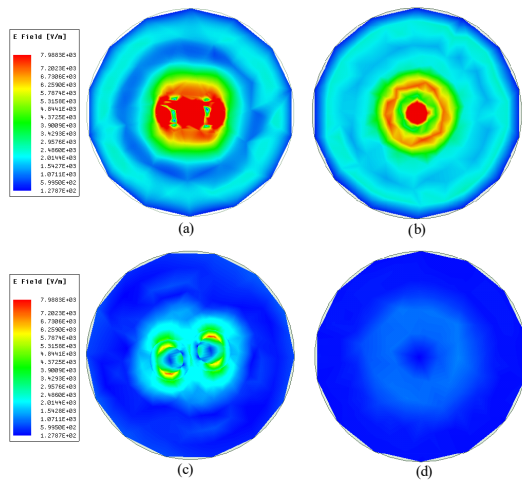


Figura 9. Intensidade de campo elétrico nas seções transversais. (a) Pi com o par. (b) Pi sem o par. (c) Pf com o par. (d) Pf sem o par.

Além dessas análises, foi realizado o cálculo para determinar a eficiência de acoplamento. Esse cálculo foi baseado no método proposto em [4], onde os planos de acoplamento (Pi) e o de saída da antena (Po) são medidos em função da potência média na seção transversal. Portanto, de acordo com [3], a potência média propagada ao longo do guia é dada pelo fluxo do vector de Poynting médio ($\vec{P}_{med}$) através da secção transversal do guia. Considerando que apenas as seções transversais dos campos contribuem para a potência média propagada, a potência média pode ser calculada a partir de (1) [3].

$$P_{med} = \iint_s \vec{P}_{med} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{2} \iint_s \text{Re}\{\vec{E} \times \vec{H}^*\} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

Para isto, foram determinados que os planos de saída da

antena e a seção de acoplamento no início do cabo tivessem 2 mm de raio. A partir dessas seções determinadas, o valor obtido de potência média para cada seção foi utilizado para o cálculo da eficiência de acoplamento. A eficiência de acoplamento foi calculada utilizando $\eta = P_{med,pi}/P_{med,po}$ [4], onde $P_{med,pi}$ é o valor medido na seção de acoplamento e $P_{med,po}$ é o valor medido na seção transversal de saída da antena. O resultado obtido na frequência 0,3 THz foi de 27,12%, mostrando que o acoplamento em par trançado é viável quando comparados com resultados da literatura, e.g. [4], [7]–[9].

V. CONCLUSÕES

Este artigo analisa o acoplamento de sinais em pares trançados operando em frequências na ordem próxima de terahertz, por meio de simulações com o *software* HFSS. Tais sistemas foram sugeridos recentemente para operar com taxas na ordem de Terabits, como evolução aos padrões DSL. Um dos desafios apresentados para a nova tecnologia é o acoplamento dos modos guiados no par trançado. As análises consideram uma antena com polarização radial acoplando sinais em um cabo com único par trançado. A eficiência de acoplamento, calculada pela razão entre a potência média acoplada no cabo e a de saída da antena, ficou da ordem de 27,12% na frequência de 0,3 THz, considerada viável quando comparada a resultados da literatura. A eficiência de acoplamento aumentará com maior número de pares, como por exemplo um cabo CAT5, que contém 4 pares trançados, o que tornará ainda mais viável a utilização no cenário Terabit DSL.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Marcos Franco.

REFERÊNCIAS

- [1] W. Foubert, C. Neus, L. V. Biesen, and Y. Rolain, "Exploiting the phantom-mode signal in DSL applications," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, pp. 896–902, April 2012.
- [2] J. M. Cioffi, K. J. Kerpez, C. S. Hwang, and I. Kanellakopoulos, "Terabit DSLs," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, pp. 152–159, November 2018.
- [3] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic waves and antennas*. Rutgers University New Brunswick, NJ, 2016. [Online]. Acessado em 19-Setembro-2018.
- [4] Z. Zheng, N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami, "Efficient coupling of propagating broadband terahertz radial beams to metal wires," *Opt. Express*, vol. 21, pp. 10642–10650, May 2013.
- [5] J. A. Deibel, K. Wang, M. D. Escarra, and D. M. Mittleman, "Enhanced coupling of terahertz radiation to cylindrical wire waveguides," *Opt. Express*, vol. 14, pp. 279–290, Jan 2006.
- [6] J. Cioffi, K. Kerpez, C. Hwang, and I. Kanellakopoulos, "G.mgfast: Waveguide transmission for extremely high speed copper transmission," tech. rep., ITU, 2017.
- [7] K. Wang and D. M. Mittleman, "Metal wires for terahertz wave guiding," *Nature*, vol. 432, pp. 376–379, 2004.
- [8] L. Chusseau and J.-P. Guillet, "Coupling and propagation of sommerfeld waves at 100 and 300 GHz," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 33, pp. 174–182, 02 2012.
- [9] A. Agrawal and A. Nahata, "Coupling terahertz radiation onto a metal wire using a subwavelength coaxial aperture," *Optics express*, vol. 15, pp. 9022–8, 08 2007.
- [10] N. Dolatsha, B. Grave, M. Sawaby, C. Chen, A. Babveyh, S. Kananian, A. Bisognin, C. Luxey, F. Ganesello, J. Costa, C. Fernandes, and A. Arbaban, "17.8 a compact 130 GHz fully packaged point-to-point wireless system with 3D-printed 26 dBi lens antenna achieving 12.5 Gb/s at 1.55pJ/b/m," pp. 306–307, 02 2017.
- [11] J. A. Deibel, M. D. Escarra, and D. M. Mittleman, "Photoconductive terahertz antenna with radial symmetry," in *Optical Terahertz Science and Technology*, p. MB3, Optical Society of America, 2005.