

# Avaliação de Modos Guiados em Par Trançado para Transmissão em Terabit/s

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

**Resumo**—A exploração de modos superiores ou guiados em cabos de pares trançados, como alternativa ao conhecido modo de linha de transmissão usado atualmente, foi proposto recentemente com o objetivo de alcançar taxas em níveis de Tbit/s. Nesse contexto, este artigo avalia a partir de simulações numéricas a utilização de modos guiados do par trançado. Os resultados são avaliados em termos de atenuação e taxa de transmissão do sistema, considerando um par trançado por usuário transmitindo quatro modos guiados. Mostra-se que para algumas situações é possível alcançar taxas acima de 1 Tbit/s em pouco mais de 10 metros.

**Palavras-Chave**—Terabit DSL, pares trançados, modos guiados, taxa de transmissão.

**Abstract**—The exploration of higher order or guided modes in twisted pair cables, as an alternative to the currently used transmission line mode, was recently proposed with the objective of reaching rates at Tbit/s levels. In this context, this paper evaluates from numerical simulations the use of twisted pair's guided modes. The results are evaluated in terms of attenuation and transmission rate of the system, considering a twisted pair per user transmitting four guided modes. It is shown that for some situations it is possible to reach rates above 1 Tbit/s in just over 10 meters.

**Keywords**—Terabit DSL, twisted-pair, guided modes, transmission rate.

## I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de tráfego e surgimento de novas aplicações em Internet das Coisas (IoT) exigem da próxima geração de sistemas de telecomunicações sem fio (5G) alta confiabilidade, baixo atraso e altas taxas de transmissão [1]. Nesse contexto, o sistema DSL (*Digital Subscriber Line*) busca soluções para que a rede de transporte 5G alcance altas taxas de transmissão reaproveitando a estrutura de cabos de pares trançado ou coaxiais já instalada, o que pode acelerar a implantação do 5G e diminuir seus custos se comparados à utilização em larga escala da fibra óptica.

Tradicionalmente, os cabos de pares trançados no sistema DSL são usados como linhas de transmissão para transportar energia eletromagnética de um ponto a outro de um sistema, usando o modo TEM (Transversal Eletromagnético). O padrão DSL atual, chamado de G.fast, transmite em frequências de 2,2 MHz a 212 MHz para alcançar taxas de até 2 Gbit/s [2], e já está em desenvolvimento o padrão G.mgfast, que expandirá a faixa até 848 MHz e objetiva de alcançar até 10 Gbit/s em comprimentos curtos ( $\leq 30$  metros) [3].

Daynara Souza<sup>1\*</sup>, Brenda Sousa<sup>1\*</sup>, Gilvan Borges<sup>2</sup>, Roberto Rodrigues<sup>1</sup>, André Cavalcante<sup>3</sup> e João Costa<sup>1</sup>. <sup>1</sup>Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brasil. <sup>2</sup>Instituto Federal do Pará, Belém-PA, Brasil. <sup>3</sup>Ericsson Telecomunicações S.A., Indaiatuba-SP, Brasil. E-mails: \*daynara.souza@itec.ufpa.br, \*brenda.ppenedo@gmail.com. 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.

Entretanto, o uso de frequências de transmissão cada vez maiores aumenta a atenuação do modo TEM no par trançado, em consequência, limita o alcance de maiores taxas de transmissão nessa estrutura. Considerando isto, existem outros modos de propagação dos tipos TE (Transversal Elétrico) e TM (Transversal Magnético) não explorados em um par trançado que podem ser usados para transmissão, chamados de modos de ordem superior ou modos guiados. Tais modos, propagam-se com distribuição de campo entre os condutores e ao redor deles, em frequências maiores que as utilizadas atualmente nos sistemas DSL, cujos comprimentos de onda associados são menores que o espaço entre os condutores [4].

Recentemente, a utilização do par trançado como guia de ondas ao invés de linha de transmissão foi proposta por [5]. Usando essa ideia, taxas de 1 Tbit/s em 100 metros podem ser alcançadas, em um sistema denominado TDSL (Terabit DSL). O trabalho se baseou na atenuação de outro guia de onda conhecido como linha de Sommerfeld, que consiste apenas de um condutor cilíndrico nu [6], para representar o comportamento esperado do guiamento em par trançado. Entretanto, não há indicação no trabalho do quanto o guia de Sommerfeld usado como modelo representa as características de uma estrutura mais complexa como o par trançado. Do mesmo modo, não há no artigo consideração sobre o efeito do isolante dielétrico envolvendo o condutor, como é característico do par trançado. Um guia com essas características talvez pudesse representar melhor o par trançado, como é o caso do guia cilíndrico constituído de um condutor envolvido por um dielétrico que foi analisado por Goubau [7].

Até onde é de conhecimento dos autores, não há trabalhos que investiguem os modos guiados do par trançado, considerando características construtivas reais, como o trançamento do par, e a utilização de materiais com perda no condutor e isolante. Para uma análise mais precisa em altas frequências, é necessário levar esses fatores em consideração, pois podem influenciar as características de transmissão do par trançado, como frequência de corte e constante de propagação.

Dessa forma, este artigo contém uma avaliação a partir de simulações numéricas dos modos guiados de um par trançado considerando suas características construtivas. A constante atenuação dos modos guiados do par trançado é comparada com a linha de Sommerfeld e Goubau, verificando assim qual desses dois modelos representa melhor o par trançado. Também é analisado neste artigo o desempenho de um sistema de comunicação utilizando os modos guiados do par trançado e comparado com o sistema TDSL proposto por [5] e com o padrão G.mgfast [3].

O restante deste artigo está organizado em cinco seções. A Seção II aborda os aspectos teóricos de interesse para o entendimento da utilização de fios condutores e pares trançados

como guia de ondas. A Seção III descreve os procedimentos utilizados para determinar a capacidade de transmissão do sistema. A Seção IV mostra a metodologia utilizada nas simulações do par trançado como guia de onda e configurações para cálculo da taxa de transmissão. A Seção V apresenta a análise dos resultados de atenuação e taxa de transmissão dos modos guiados. Por fim, a Seção VI mostra as conclusões.

## II. MODOS GUIADOS DO PAR TRANÇADO

O modo TEM, em que as componentes longitudinais dos campos elétrico e magnético são nulas, é o modo de propagação usado em linhas de dois fios condutores como o par trançado da Fig. 1a. Sobre condições idealizadas, em que os condutores são perfeitos, paralelos e imersos em um meio dielétrico homogêneo, o único modo de propagação existente é o TEM. Isso ocorre apenas para frequências de operação cujos comprimentos de onda associados sejam bem maiores que as dimensões da seção transversal da linha (Fig. 1b), caso contrário coexistirão outros modos de propagação [4], [8]. Esses modos podem ser dos tipos TE, no qual a componente longitudinal do campo elétrico é nula, ou TM, caso em que a componente longitudinal do campo magnético é nula.

Existem vários modelos de linha de transmissão para o par trançado considerando o modo de propagação TEM [8], entretanto, há poucas informações na literatura sobre os modos guiados do par trançado. Dessa forma, o estudo de guias de onda constituídos de condutores cilíndricos com modelagem analítica bem estabelecida, mostrados na Fig. 2, podem ajudar a entender e avaliar o guiamento no par trançado. Esses guias são chamados de guias de onda de superfície, pois os campos eletromagnéticos são guiados ao longo da superfície do condutor [9].

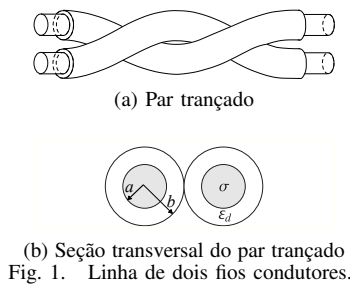


Fig. 1. Linha de dois fios condutores.

A possibilidade do guiamento de uma onda eletromagnética ao longo de um condutor cilíndrico nu, mostrado na Fig. 2a, foi demonstrado por Sommerfeld em 1899. Ele provou que o modo de propagação principal é do tipo TM sem frequência de corte e existe somente se a condutividade do condutor ( $\sigma$ ) for finita. Além disso, o modo TM exibe uma atenuação muito baixa ao longo do seu comprimento e é fracamente ligada a superfície [6]. Por outro lado, essa onda de superfície na linha de Sommerfeld se estende a uma distância considerável do condutor antes de decair a um valor desprezível, o que aumenta as chances de a onda guiada ser perturbada por objetos próximos, imperfeições e curvas ao longo da linha [7], [10]. Este problema pode ser mitigado pela adição de um revestimento dielétrico na superfície do condutor, o que faz com que o campo fique mais confinado na superfície da linha,

isto foi considerado primeiro por Harms e estudado mais tarde em detalhes por Goubau - em uma configuração conhecida como linha de Goubau ou de Harms-Goubau, mostrada na Fig. 2b [7], [10].

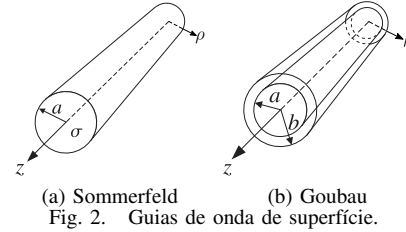


Fig. 2. Guias de onda de superfície.

Uma análise das equações de propagação dos campos eletromagnéticos nos guias de Sommerfeld e Goubau podem ser encontradas em [10]. A partir das soluções dessas equações, considerando a condutividade do condutor de cobre igual a  $5,8 \times 10^7$  S/m e isolante de polietileno com permissividade relativa igual a 2,26, pode-se comparar pela Fig. 3 alguns parâmetros de propagação dos guias de Sommerfeld e Goubau.

A Fig. 3a apresenta o perfil do campo elétrico longitudinal  $E_z$  em função da distância para o centro do condutor  $\rho$  (veja Fig. 2) dos guias de Sommerfeld e Goubau, demonstrando que a adição da cobertura dielétrica deixa o campo mais próximo à superfície. Contudo, a atenuação no guia de Goubau é determinada pela soma das atenuações no dielétrico e condutor, dessa forma, apresenta valores maiores do que o guia de Sommerfeld, como visto na Fig. 3b.

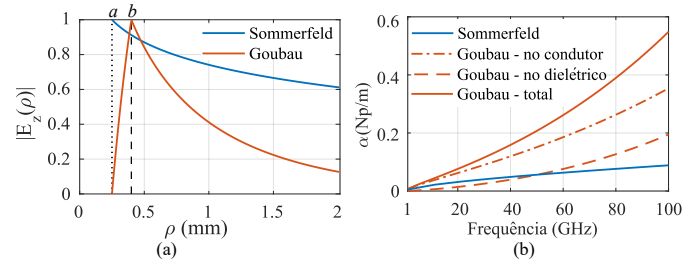


Fig. 3. Parâmetros das linhas de Sommerfeld e Goubau com raio do condutor  $a$  de 0,25 mm e raio do isolante  $b$  igual a 0,4 mm. (a) Campo elétrico longitudinal  $E_z(\rho)$  em 100 GHz. (b) Constante de atenuação  $\alpha$  na faixa de 1 a 100 GHz.

## III. DESEMPENHO DA TRANSMISSÃO TDSL

Uma forma de avaliar o desempenho de sistema de comunicação é estimando sua capacidade de transmissão. Isto pode ser feito a partir da fórmula de Shannon:

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR), \quad (1)$$

em que a capacidade do canal de transmissão  $C$  é função da largura de banda  $BW$  e da relação sinal ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*), dada por:

$$SNR = \frac{|H|^2 \cdot P_t}{\sigma^2 + I}, \quad (2)$$

que por sua vez depende do módulo da função de transferência do canal de transmissão  $|H|$ , da potência do transmissor  $P_t$ , da densidade espectral de potência  $\sigma^2$  do ruído gaussiano branco aditivo (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*) e da soma

da potência de todas as interferências que atingem o canal de transmissão  $I$ .

Como na transmissão em sistemas DSL os dados são transmitidos via um conjunto de subcanais independentes com largura fixa  $\Delta f$  (i.e., utiliza-se o DMT - *Discrete Multitone Modulation*), a capacidade total de transmissão  $C_{tot}$  é:

$$C_{tot} = \Delta f \sum_{M \in m} \sum_{K \in k} \log_2 \left( 1 + \frac{SNR_{k,m}}{\Gamma} \right), \quad (3)$$

onde  $SNR_{k,m}$  é a relação sinal ruído por subcanal  $k$  do modo de propagação  $m$ , e as variáveis  $K$  e  $M$  representam, respectivamente, a quantidade total de subcanais e de modos de propagação da transmissão. O fator  $\Gamma$  representa o gap de SNR e é definido para que o sistema atenda as restrições de taxa de erro de bit de esquemas práticos de modulação e codificação. Seu valor em dB pode ser aproximado por  $\Gamma_{dB} \approx 9.75 + \gamma_m - \gamma_c$ , onde  $\gamma_c$  é o ganho de codificação e  $\gamma_m$  é a margem do sistema desejada [11].

#### IV. METODOLOGIA

##### A. Simulações numéricas no Software HFSS

As simulações numéricas foram realizadas no *software* comercial HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), que utiliza o método dos elementos finitos para simulações eletromagnéticas no domínio da frequência. No cenário de simulação deste artigo, o *software* HFSS foi usado para determinar a constante de propagação dos modos guiados em um par trançado, que posteriormente será usada para avaliar a capacidade de transmissão do sistema.

As configurações utilizadas no simulador são: uma *waveport* em cada extremidade do par trançado, com quatro modos guiados cada; faixa de frequência de 1 GHz a 300 GHz usando 100 pontos; e consideração da causalidade dos materiais, ou seja, permissividade e condutividade dependente da frequência.

As simulações foram realizadas usando um par trançado do cabo CAT5e, com raios do condutor de cobre  $a$  e do isolante de polietileno  $b$  iguais a 0,255 mm e 0,395 mm, respectivamente. Para simplificar a simulação em termos de recursos computacionais, foi utilizado um par trançado com comprimento total de 12,63 mm, que corresponde ao comprimento de apenas uma trança.

##### B. Considerações para a Avaliação de Desempenho

Os dados de constante de propagação por unidade de comprimento, obtidos na simulação no *software* HFSS, são utilizados para obter a função de transferência de um canal, ou *link*, de comprimento  $l$ , usando a seguinte equação:

$$H = e^{-\gamma l} = e^{-(\alpha + j\beta)l} \quad (4)$$

$$|H| = e^{-\alpha l}$$

onde  $\gamma$  é a constante de propagação. A parte real de  $\gamma$  é a constante de atenuação  $\alpha$  e a parte imaginária de  $\gamma$  é a constante de fase  $\beta$ . Esse modelo de função de transferência é válido quando a impedância da fonte de excitação é igual a impedância característica do modo de propagação (casamento de impedância) [10].

Em relação ao *crosstalk* entre os modos, é possível utilizar um modelo baseado na constante de propagação de cada modo

para estimá-lo. Neste artigo, no entanto, o *crosstalk* entre os modos é desconsiderado, uma vez que existem técnicas de pré-codificação de canal que podem mitigá-lo, e.g., NLP (*Non-Linear Precoder*) e SVD (*Singular Value Decomposition*) [5].

A taxa de transmissão do sistema foi determinada realizando os procedimentos mostrados na Seção III. As configurações utilizadas no cálculo estão de acordo com [5], e são mostradas na Tabela I:

TABELA I. PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA TAXA DE TRANSMISSÃO.

| Parâmetro  | Valor       |
|--|-------------|
| Número total de subcanais $K$                      | 4096        |
| Máximo de bits por subcanal                        | 12          |
| Ganho de codificação $\gamma_c$                    | 7,0 dB      |
| Margem $\gamma_m$                                  | 6,0 dB      |
| Potência total de transmissão $P_t$                | 20 dBm      |
| Densidade espectral de potência $\sigma^2$ do AWGN | -160 dBm/Hz |

#### V. RESULTADOS

##### A. Análise das Simulações Eletromagnéticas

Nesta seção são avaliados os resultados da simulação eletromagnética no *software* HFSS dos modos guiados no par trançado. A Fig. 4 mostra a constante de atenuação dos quatro primeiros modos guiados em um par trançado, o mesmo número de modos considerado em [5]. Pode-se ver que para frequências abaixo 60 GHz apenas dois modos se propagam com baixa atenuação, o 1° e 2° modo. Esses modos são correspondentes aos modos de superfície do par trançado, já que não possuem frequência de corte e correspondem ao mesmo número de condutores. Já os 3° e 4° modos possuem frequências de corte e se propagam com atenuação menores que 1 Nepper por metro (Np/m) a partir de 64 GHz e 78 GHz, respectivamente. Eles correspondem aos modos que são guiados entre os condutores em frequências cujos comprimentos de onda são menores que a separação entre eles.

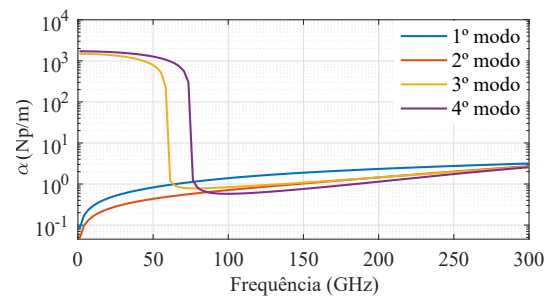


Fig. 4. Constante de atenuação  $\alpha$  para os quatro primeiros modos guiados em um par trançado simulado no *software* HFSS.

Na Fig. 5 as atenuações dos modos guiados no par trançado são comparadas com as dos guias de onda de superfície de Sommerfeld e Goubau, considerando os mesmos materiais e valores de raios do condutor e isolante usados no par trançado. Quando o sistema TDSL foi proposto, idealizava-se que os níveis de atenuação apresentados pelos modos guiados no par trançado fossem próximos ao da linha de Sommerfeld [5]. Entretanto, conforme se observa na Fig. 5, a atenuação apresentada pelos modos guiados no par trançado é muito

mais alta. Por exemplo, o guia de Sommerfeld apresenta atenuação máxima de 0,19 Np/m, enquanto os modos guiados no par trançado sofrem atenuações entre 2,56 e 3,16 Np/m em 300 GHz. Por outro lado, percebe-se que as constantes de atenuação dos modos guiados em um par trançado têm níveis próximos ao da linha de Goubau, provavelmente devido a ambos possuírem isolante em torno do condutor.

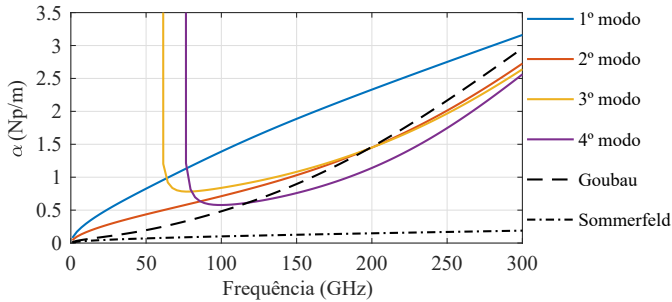


Fig. 5. Constante de atenuação  $\alpha$  dos quatro primeiros modos guiados de um par trançado, das linhas de Sommerfeld e Goubau simulados no HFSS.

Já a Fig. 6 mostra os padrões de distribuição do campo elétrico dos modos considerados. Na prática, cada modo precisa ser excitado por uma antena com padrão de radiação similar aos mostrados na Fig. 6, e devido a esses modos possuírem padrões muito distintos entre si, o acoplamento de cada modo guiado do par trançado é mais difícil. Neste artigo, foi considerado um acoplamento perfeito, em que toda a potência inserida na fonte é enviada para o par trançado, no entanto, na prática a eficiência de acoplamento não será perfeita.

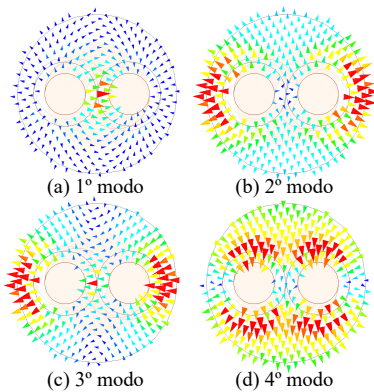


Fig. 6. Padrões de distribuição do campo elétrico de cada modo em 200 GHz.

### B. Análise da Taxa de Transmissão

Esta seção apresenta uma análise de desempenho do sistema de comunicação, baseado nas simulações eletromagnéticas realizadas no HFSS, que utiliza o par trançado para o guiamento de sinais. A primeira comparação a ser feita, é o desempenho do sistema usando as simulações numéricas deste artigo com o alcançado pelos idealizadores do sistema TDSL [5]. Duas faixas de frequência foram propostas em [5]. A primeira foi a faixa de frequência de 100 a 300 GHz, usada para comprimentos menores que 150 metros, e atingiu-se 1 Tbit/s em 100 metros [5]. Já para comprimentos maiores foi usada a faixa de frequência de 50 a 150 GHz, e atingiu-se 325 Gbit/s em 300 metros [5].

Na Fig. 7 temos as taxas agregadas dos quatro modos guiados no par trançado para essas duas faixas de frequências usando as configurações mostradas na Tabela I. Observa-se que para comprimentos maiores que 16 metros a taxa é zero nas duas faixas usadas. Além disso, as taxas obtidas a partir das simulações numéricas são muito abaixo do idealizado no sistema TDSL. Por exemplo, para a faixa de frequência de 100 a 300 GHz e comprimento de 10 metros, atingiu-se 50 Gbit/s a partir das simulações numéricas, enquanto a taxa estimada em [5] é mais de 7 Tbit/s. A razão para isto é a atenuação dos modos guiados ser muito mais alta do que a descrita em [5], conforme análise da Fig. 5, resultando assim em uma taxa de transmissão menor.

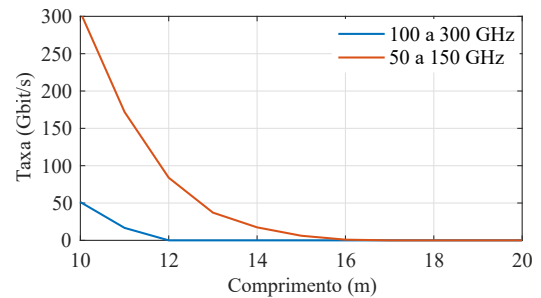


Fig. 7. Taxa agregada usando os quatro modos guiados em função do comprimento do par trançado usando a faixa de frequência de 50 a 150 GHz e 100 a 300 GHz.

Para encontrar um cenário que melhor explore o potencial de transmissão dos modos guiados do par trançado, a potência total de transmissão foi variada, levando em consideração valores assumidos em [5] e [12]. Além disso, com base na SNR associada a cada modo guiado variando em função da potência, definiu-se uma faixa de frequência de transmissão mais adequada, isto é, aquela em que a SNR permanece acima de zero dB. A Fig. 8 mostra a SNR em dB de cada modo em função da frequência variando a potência total de transmissão. Como há quatro modos guiados, a faixa de frequência determinada foi a união das faixas adequadas de cada modo, como apresentado na Tabela II.

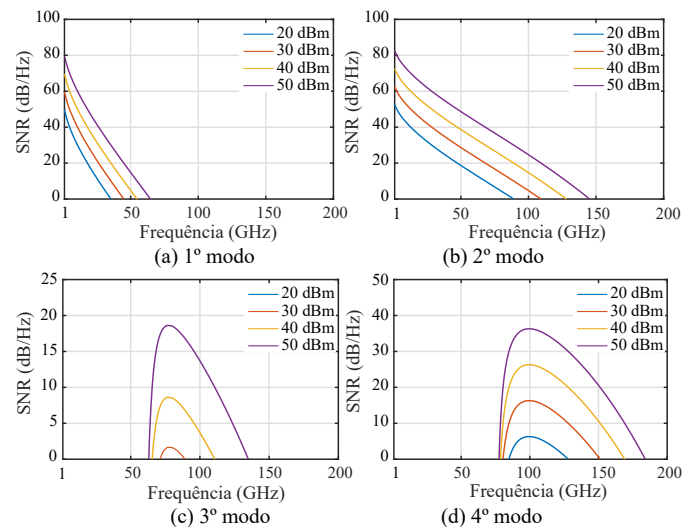


Fig. 8. SNR (dB) em função da frequência em um par trançado de 10 metros de comprimento variando a potência total de transmissão.

TABELA II. FAIXA DE FREQUÊNCIA DE TRANSMISSÃO DE ACORDO COM O VALOR DE POTÊNCIA TOTAL  $P_t$ .

| $P_t$ (dBm) | Frequência mínima | Frequência máxima |
|-------------|-------------------|-------------------|
| 20          | 1 GHz             | 130 GHz           |
| 30          | 1 GHz             | 150 GHz           |
| 40          | 1 GHz             | 170 GHz           |
| 50          | 1 GHz             | 180 GHz           |

Com essas novas configurações de potência total e faixa de frequência, a taxa de transmissão em função do comprimento de cada modo guiado é calculada, como mostra a Fig. 9. Observa-se que os 3° e 4° modos são limitados a poucos metros mesmo quando se aumenta a potência total de transmissão. Além disso, é possível perceber que o 2° modo possui um melhor desempenho que os outros modos, podendo alcançar até 1,36 Tbit/s em 10 metros, enquanto o 3° modo é o que apresenta a menor taxa de transmissão, atingindo no máximo 300 Gbit/s em 10 metros.

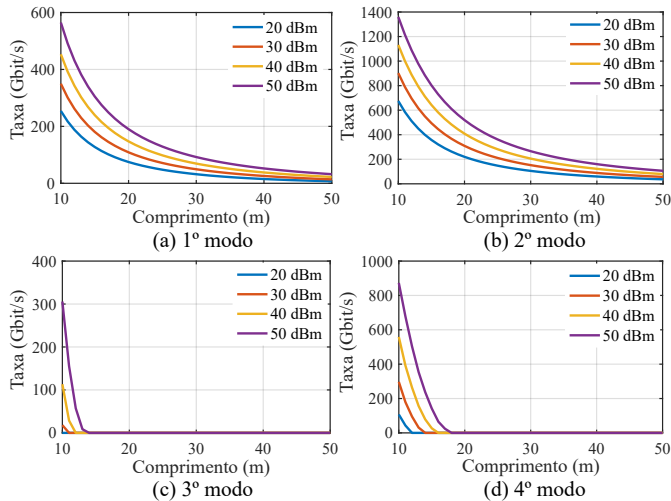


Fig. 9. Taxa de transmissão dos modos guiados no par trançado usando a faixa de frequência e potência total mostrada na Tabela II.

Finalmente, ainda considerando essas modificações nas configurações da transmissão, a taxa agregada dos quatro modos guiados pode ser comparada tanto com o sistema TDSL proposto originalmente por [5] quanto com o padrão G.mgfast, como mostra a Fig. 10. Observa-se que apesar da taxa de transmissão ser muito abaixo do esperado originalmente para o sistema TDSL, ainda é possível alcançar taxas maiores que 1 Tbit/s em comprimentos menores que 17 metros, sendo possível atingir no máximo 3,1 Tbit/s em 10 metros usando 50 dBm de potência. Em relação ao sistema G.mgfast, percebe-se que as taxas de transmissão dos modos guiados no par trançado são maiores que a desse padrão, principalmente para comprimentos menores, podendo ser até 100 vezes maior em 10 metros de comprimento.

## VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma análise do desempenho de sistemas de transmissão em par trançado, operando em frequências da ordem de GHz, nas quais modos de maior ordem propagam-se como modos guiados, de acordo com a proposta de sistemas TDSL apresentada em [5], para alcance de taxas de transmissão em níveis de Tbps. A taxa de transmissão

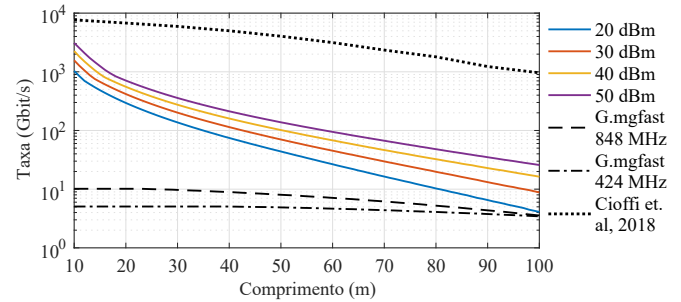


Fig. 10. Comparação da taxa agregada de transmissão do par trançado usando a faixa de frequência e potência total mostrada na Tabela II, com o padrão G.mgfast, e com as taxas do sistema TDSL feitas por Cioffi et. al, 2018 [5]. indicada em [5] considera perdas equivalentes ao modelo de linha de Sommerfeld, que possui atenuação relativamente baixa. Visando uma investigação mais realista, neste trabalho foram realizadas simulações numéricas no *software* HFSS considerando características construtivas de sistemas DSL, tais como dimensões, trançamento dos pares e materiais do condutor e isolante. Os resultados mostraram que a atenuação dos modos se situa bem acima da considerada em [5] e dessa forma, a taxa de transmissão alcançada é bem menor que a idealizada. Entretanto, mostra-se que é possível operar com configurações de potência de transmissão e faixas de frequência para alcançar taxas de dados de até 3 Tbps, que são bastante superiores às permitidas nos novos padrões G.mgfast propostos para o par trançado [3], [13].

## VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Marcos Franco.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, "What will 5G be?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, pp. 1065–1082, June 2014.
- [2] *Recommendation G.9701: Fast Access to Subscriber Terminals (FAST) Physical layer specification*, December 2014.
- [3] *Recommendation: Multi-Gigabit fast access to subscriber terminals (MGfast) - PHY*, October 2018.
- [4] Y. Leviatan and A. Adams, "The response of a two-wire transmission line to incident field and voltage excitation, including the effects of higher order modes," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, pp. 998–1003, Sep. 1982.
- [5] J. M. Cioffi, K. J. Kerpez, C. S. Hwang, and I. Kanellakopoulos, "Terabit DSLs," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, pp. 152–159, November 2018.
- [6] J. A. Stratton, *Electromagnetic theory*. New York and London: McGraw-Hill Book Company, 1941.
- [7] R. E. Collin, *Field theory of guided waves*. New York, Toronto and London: McGraw-Hill Book Company, 1960.
- [8] G. S. Borges, *Modelagem de par-trançado para comunicações em banda larga*. PhD thesis, Universidade Federal do Pará, 2016.
- [9] T. K. Sarkar, M. N. Abdallah, M. Salazar-Palma, and W. M. Dyab, "Surface plasmons-polaritons, surface waves, and zenneck waves: Clarification of the terms and a description of the concepts and their evolution," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59, pp. 77–93, June 2017.
- [10] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic waves and antennas*. Rutgers University New Brunswick, NJ, 2016.
- [11] T. Starr, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman, *Understanding digital subscriber line technology*. Prentice Hall PTR, 1999.
- [12] S. Galli, J. Liu, and G. Zhang, "Bare metal wires as open waveguides, with applications to 5G," in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, May 2018.
- [13] W. Coomans, R. B. Moraes, K. Hooghe, A. Duque, J. Galaro, M. Timmers, A. J. van Wijngaarden, M. Guenach, and J. Maes, "XG-fast: the 5th generation broadband," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, pp. 83–88, Dec 2015.