

Incorporação de Nanoantenas em Fibras Multinúcleo

Gonçalo A. Figueiredo*, João Paulo N. Torres[†] and P. Mendonça dos Santos[‡]

*^{†‡}Academia Militar, R. Gomes Freire 203, 1169-203 Lisboa, Portugal

^{†‡}Instituto de Telecomunicações, Av. Rovisco Pais, N° 1, Torre Norte 10° piso, 1049-001, Lisboa, Portugal

* figueiredo.ga@academiamilitar.pt, [†] joaoptorres@hotmail.com, [‡] pms@lx.it.pt

Resumo—O presente estudo pretende mitigar o *crosstalk* em fibras multinúcleo através da incorporação de nanoantenas em fibras multinúcleo. O estudo foi feito em três etapas, começando com o desenvolvimento de um modelo de simulação com o *software COMSOL Multiphysics* corroborado com modelos teóricos, progredindo para testes isolados no ganho na frequência de nanoantenas e terminando com uma análise do efeito destas nanoantenas no *crosstalk* de fibras multinúcleo, quando as mesmas são introduzidas no seu interior. O estudo concluiu que a utilização de nanoantenas de ranhuras de ouro longitudinais na banda de frequência do visível consegue uma redução de 75 dB no *crosstalk* em comparação com fibras multinúcleo *singlemode*. Por outro lado, ao longo do estudo também foi analisado o efeito de concentração de campo das nanoantenas. Este estudo concluiu que a utilização de nanoantenas de ranhuras de alumínio induz uma concentração de campo em 39%.

Palavras-Chave—Fibras multinúcleo, COMSOL Multiphysics, Crosstalk, Nanoantenas, GNR.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve um avanço tecnológico significativo na área das telecomunicações. Entre os principais marcos, destaca-se a capacidade de envio de vídeos através de dispositivos móveis.

Neste contexto, vários países implementaram o uso de *bodycams* pelas forças de segurança, de forma a auxiliar as suas ações policiais [1]. Em Portugal, a introdução destes dispositivos na Guarda Nacional Republicana (GNR) e Polícia de Segurança Pública (PSP) está prevista para um futuro próximo, [2]. No entanto, para que tal seja possível, é necessária a existência de uma infraestrutura adequada que permita a transmissão do vídeo captado pelas *bodycams* para uma base de dados. Atualmente, a rede Sistema Integrado de Redes de Emergência e Segurança de Portugal (SIRESP) não tem capacidade de operar com sinais de vídeo, uma vez que a mesma opera com a rede *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA), [3].

Assim, é fundamental a criação de uma rede de comunicação nas forças de segurança que disponha de larguras de banda e capacidades adequadas para a transmissão de vídeo. Neste sentido, surge o interesse do desenvolvimento e da aplicação de fibras óticas com maior largura de banda e capacidade, uma vez que estas constituem um elemento essencial ao funcionamento de qualquer rede de telecomunicações.

As *Multicore Fiber* (MCF) apresentam um elevado potencial para constituírem a próxima geração de fibras óticas, sendo capazes de cumprir e superar os requisitos para a transmissão de vídeo de alta qualidade. No entanto, esta tecnologia enfrenta diversos desafios. Um dos principais é o fenómeno de *crosstalk*, XT, que compromete a largura de banda e

a capacidade teórica das fibras óticas, [4]. Torna-se, assim, crucial o desenvolvimento de estratégias para ultrapassar este problema, visando otimizar o desempenho das MCF. Vários autores têm feito publicações sobre potenciais tecnologias que possam ser utilizadas na mitigação deste efeito e será neste âmbito em que esta dissertação se enquadra, [5]–[8]. Com a implementação desta infraestrutura é possível equipar todos os dispositivos da GNR com *bodycams* pessoais.

II. FIBRAS ÓTICAS MULTINÚCLEO

A evolução da capacidade e do alcance das fibras óticas tem obedecido à “Lei de Moore ótica”, nas últimas décadas nota-se que o produto entre o alcance e a capacidade das fibras duplica anualmente [9]. No entanto, o limite de 100 Tb/s tem representado um desafio considerável à progressão da capacidade das fibras óticas. Na próxima década, estima-se que haja a necessidade de capacidades na ordem dos Pb/s [10]. A técnica *Space-Division Multiplexing* (SDM) pode vir a ser uma solução para este problema, na medida em que utiliza fibras com vários núcleos [11]. Esta ideia foi proposta, pela primeira vez, em 1979. No entanto, nessa altura, os métodos de fabrico disponíveis não permitiam a obtenção de bons resultados [10]. Nas últimas décadas, esta tecnologia passou por várias fases de desenvolvimento, nomeadamente sistemas opto-eletrónicos de regeneração sucessivos, amplificadores de controlo de dispersão e amplificadores coerentes digitais [10]. Todos estes progressos contribuíram para a viabilidade da tecnologia das MCFs. Todavia, esta tecnologia apresenta, também, novos problemas, nomeadamente o *crosstalk*.

A implementação desta tecnologia exige a adaptação de diversos sistemas auxiliares, como emissores, receptores, amplificadores, entre outros.

A. Crosstalk nas fibras multinúcleo

Conforme abordado anteriormente, a introdução de vários núcleos numa fibra gera o problema de *crosstalk*. Este resulta da interferência dos campos eletromagnéticos que se propagam nos vários núcleos, o que, por sua vez, modifica a informação transmitida pela fibra, aumentando o *Bit Error Rate* (BER). Este efeito é potenciado quando existem dobras ou torções nas fibras e depende, principalmente, da distância entre os núcleos [5]. O cálculo experimental do *crosstalk* pode ser realizado através da equação (1), retirada de [12]. Esta equação é aplicada quando apenas um dos núcleos é excitado e não existe outra fonte de sinal na fibra.

$$\langle XT \rangle \equiv \left\langle \frac{|A_2(L)|^2}{|A_1(0)|^2} \right\rangle \quad (1)$$

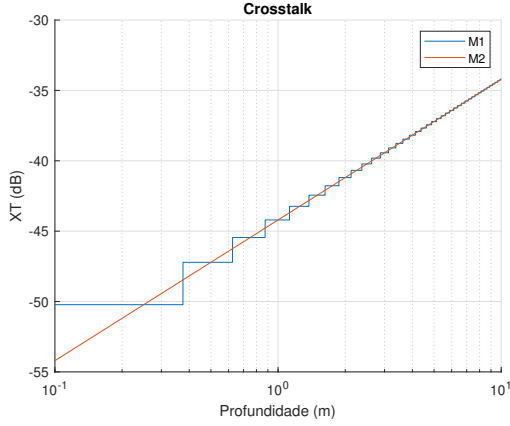


Figura 1. Gráfico a comparar o *crosstalk* entre dois modelos. M1 é o modelo do artigo [12], M2 é do artigo [13].

Em que $A_2(L)$ representa a amplitude do campo elétrico no núcleo afetado pelo *crosstalk* ao longo do comprimento L da fibra e $A_1(0)$ corresponde à amplitude inicial do campo elétrico no núcleo excitado. No entanto, existem vários modelos teóricos que permitem estimar o comportamento do *crosstalk* com base na estrutura da fibra. No artigo [12], foi deduzido o *crosstalk* médio para fibras MCF quase homogêneas utilizando os coeficientes de acoplamento.

Nas situações em que o raio de curvatura da fibra não ultrapassa o valor crítico, é possível aproximar as perturbações na fibra como contribuições discretas em pontos específicos da fibra, denominados *Phase Matching Points* (PMP). Estes pontos têm a particularidade de que a diferença entre os índices de refração efetivos dos núcleos da fibra é zero. No artigo em questão, os efeitos de torção e dobra da fibra foram incluídos nos coeficientes de acoplamento. A seguinte equação permite calcular o valor expectável para o XT.

$$\langle XT \rangle = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{N_c} N |K'_{nm}|^2 \quad (2)$$

Com N_C a representar o número de núcleos e N o número de PMP na fibra. O coeficiente de acoplamento discreto K'_{nm} é considerado igual para todos os segmentos da fibra, a dedução deste coeficiente é feita no artigo [12]. Vários estudos propuseram expressões em forma fechada para estimar o *crosstalk* médio entre núcleos. Por exemplo, em [13], os núcleos exteriores são modelados como estando dispostos helicoidalmente em torno de um núcleo central, este efeito geométrico é incorporado na constante de propagação. Na Fig. 1, fazemos uma comparação entre os dois modelos referidos.

Na Fig. 1, foram aplicados os mesmos parâmetros a ambos os modelos. Como mostrado, o modelo de [12] começa a apresentar discretização a menores profundidades, o que resulta do número limitado de PMP.

B. Redução do efeito de *crosstalk*

Na literatura, estão descritas várias técnicas capazes de reduzir o *crosstalk*. Para além da alteração dos parâmetros de torção, do raio de curvatura e da distância entre os núcleos,

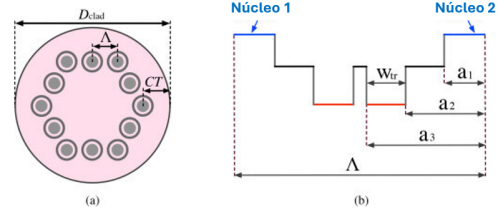


Figura 2. Imagem ilustrativa de uma fibra ótica com a tecnologia TA-MCF. A figura (a) representa um esquema da fibra ótica e a figura (b) mostra a diferença entre os índices de refração, W_{tr} representa a espessura da camada *trench*, adaptado de [14].

é, ainda, possível diminuir o XT através de alterações na estrutura da fibra. Por exemplo, a técnica *Trench Assisted Multicore Fiber* (TA-MCF) permite diminuir os níveis de *crosstalk* na fibra através de camadas de revestimento adicionais [5], [6]. Esta técnica consiste no revestimento do núcleo com uma camada, denominada *trench*, cujo índice de refração é inferior ao da camada do revestimento. Isto cria duas camadas onde pode acontecer reflexão total. Na prática, o coeficiente κ_{nm} é reduzido em uma ordem de grandeza, o que, por sua vez, permite aumentar a densidade de núcleos na fibra [5]. O estudo permitiu concluir que a aplicação desta técnica conduz a reduções de *crosstalk* na ordem de 30 dB, contudo, estes valores dependem da estrutura da camada *trench*.

III. NANOESTRUTURAS METÁLICAS

Desde o início das comunicações sem fio, as antenas têm sido uma peça fundamental na conversão de correntes elétricas em ondas eletromagnéticas e vice-versa. O termo nanoantenas surgiu na literatura durante o estudo de estruturas, na nanoescala, capazes de receber e emitir sinais óticos [15]. Por norma, uma nanoantena consiste numa placa metálica com espessura na ordem de centenas de nanômetros. Ao contrário das antenas convencionais, cuja condição de ressonância ocorre tipicamente a metade do comprimento de onda, as nanoantenas conseguem atingir o estado de ressonância em dimensões significativamente menores, através do fenómeno *surface plasmon polaritons* (SPP) [16].

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidas tecnologias de nanoantenas aplicadas a biossensores, células fotovoltaicas, comunicações óticas e até a microscopia ou espectroscopia [17], [18]. Atualmente, as nanoantenas podem ser classificadas quanto à estrutura ou à tecnologia. A estrutura refere-se à forma física da antena, como, por exemplo, em forma de dipolo [19], em Yagi-Uda [20], ou em espiral [21]. As nanoantenas metálicas apresentam outras características próprias, nomeadamente no que diz respeito ao coeficiente de reflexão. Nos metais, esse coeficiente costuma ser próximo de 100%. No entanto, na zona ótica, esse valor diminui bastante, pois a espessura do metal é reduzida para a escala de centenas de nanômetros [22]. Este fenómeno ocorre devido ao princípio dos SPP, que permite a propagação de ondas evanescentes no interior do metal.

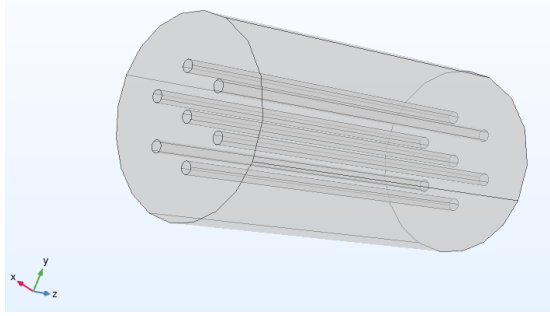


Figura 3. Esquemático de uma fibra de 7 núcleos no COMSOL, consoante o artigo [12].

IV. MODELO DA FIBRA MULTINÚCLEO NO COMSOL

No software *COMSOL Multiphysics*, recorreu-se ao módulo *Electromagnetic Waves, Beam Envelopes* para a construção de um modelo para estimar o crosstalk. Este módulo permite a excitação seletiva de um único núcleo da fibra e a análise da propagação do campo elétrico ao longo da fibra, através da equação de onda. Este módulo requer a definição explícita da fase associada à equação de onda, a qual depende diretamente da geometria da fibra e do tipo de perturbação presente. A fibra utilizada apresenta as mesmas características descritas no artigo [12], consistindo em sete núcleos dispostos simetricamente em torno de um núcleo central, todos equidistantes uns dos outros a uma distância P . A Fig. 3 ilustra a geometria da fibra descrita em [12].

Durante este estudo, verificou-se que a discretização da malha exerce um efeito significativo na precisão do cálculo do *crosstalk*. Foram analisados três aspetos específicos da malha: o número de elementos no núcleo, o número de elementos no revestimento e o número de cortes longitudinais ao longo da fibra. Após múltiplas simulações com diferentes configurações, identificou-se uma combinação de parâmetros que resulta num erro absoluto médio percentual de apenas 1,45% em relação ao modelo teórico. Essa configuração inclui 40 segmentos em profundidade, revestimento com malha *extra fine* e dimensões dos elementos do núcleo no intervalo $8 \times 10^{-7} \text{ m} < x < 1 \times 10^{-6} \text{ m}$. A Fig. 4 apresenta a comparação entre os resultados do modelo teórico e os obtidos na simulação em COMSOL, evidenciando a precisão alcançada.

O modelo apresentado no artigo [12] permite estimar o *crosstalk* no caso de mais do que um núcleo excitado. Recorrendo ao COMSOL, foi simulada a propagação de campos com os seis núcleos externos excitados com a mesma potência, de forma a validar o modelo proposto. Utilizando a mesma configuração de malha apresentada na Fig. 4, calculou-se o *crosstalk*, obtendo-se uma reta com erro absoluto médio percentual de 6,24%. Embora o erro aumente quando são excitados seis núcleos em vez de apenas um, a previsão do *crosstalk* mantém-se com erro inferior a 10%, conforme ilustrado na Fig. 5.

V. ESTUDO DAS NANOANTENAS

As nanoantenas analisadas são de duas tipologias, antena de buracos e de ranhuras. As estruturas das duas antenas

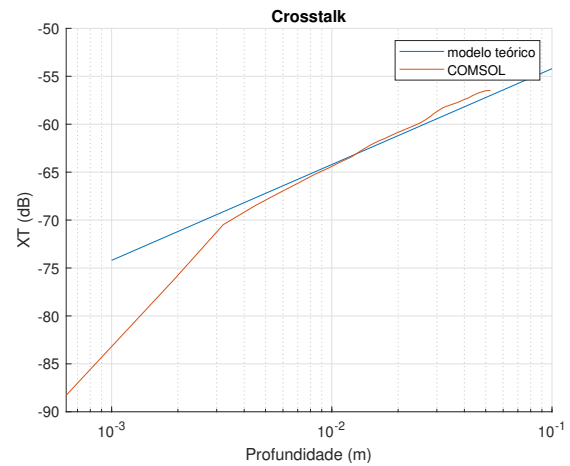


Figura 4. Comparação do *crosstalk* teórico com uma fibra simulada em COMSOL.

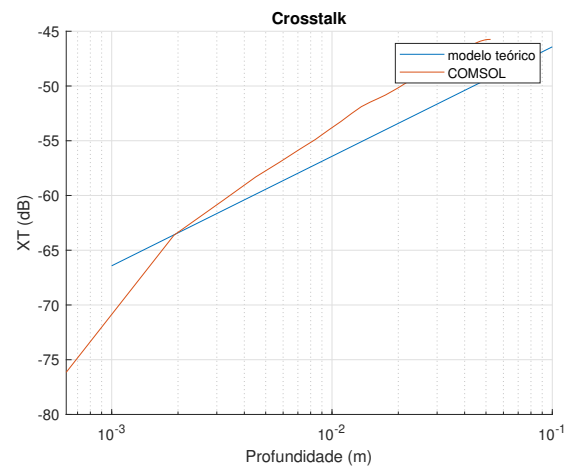


Figura 5. Comparação do *crosstalk* para 6 núcleos entre o modelo teórico e a simulação no COMSOL.

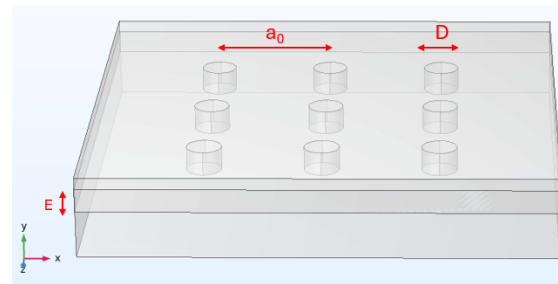


Figura 6. Nanoantena de buracos simulada no COMSOL.

analisadas são apresentadas nas Figuras 6, 7.

As nanoantenas apresentadas são caracterizadas por três parâmetros: a espessura E , a distância entre as aberturas a_0 e o tamanho das aberturas D . Nas simulações, foram utilizados os seguintes valores: $E = 100 \text{ nm}$, $D = 150 \text{ nm}$ e $a_0 = 0,5 \text{ m}$. A Tabela I mostra as frequências que registam o maior e menor ganho da nanoantena resultantes do varrimento de frequência do ganho, entre 250 THz e 1200 THz. Os restantes componentes da simulação são constituídos por sílica, com um índice de refração de 1,45.

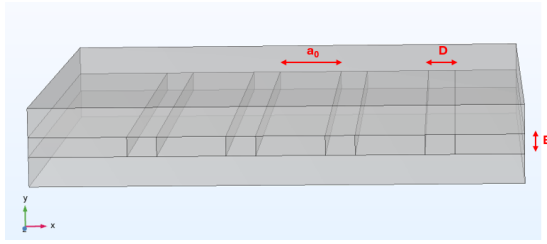


Figura 7. Nanoantena de ranhuras simulada no COMSOL.

Tabela I
FREQUÊNCIAS (THZ) PARA OS DIFERENTES MATERIAIS EM
NANOANTENAS DE RANHURAS.

Material	freq _r ⁺	freq _b ⁺	freq _r ⁻	freq _b ⁻
Ouro	340	960	610	480
Prata	790	810	860	680
Platina	250	940	490	410
Alumínio	250	980	450	420

Tabela II
EFEITO DAS NANOANTENAS DE BURACOS NA DISPERSÃO DO FEIXE. O
DESVIO PADRÃO σ FOI MULTIPLICADO POR 10^6 .

Material	σ_i^+	σ_o^+	σ_i^-	σ_o^-
Ouro	0,430	0,468	0,858	1,003
Prata	0,513	0,523	0,612	0,724
Platina	0,439	0,545	1,012	0,932
Alumínio	0,420	0,490	1,003	1,157

Tabela III
EFEITO DAS NANOANTENAS DE RANHURAS NA DISPERSÃO DO FEIXE. O
DESVIO PADRÃO σ FOI MULTIPLICADO POR 10^6 .

Material	σ_i^+	σ_o^+	σ_i^-	σ_o^-
Ouro	1,193	1,166	0,616	0,614
Prata	0,468	0,527	0,438	0,444
Platina	1,790	1,415	0,748	0,678
Alumínio	1,755	1,390	1,001	0,614

O efeito das nanoantenas na concentração, ou dispersão do feixe, é apresentado nas Tabelas II, III. Para calcular o efeito da dispersão, foi realizado um ajuste de curvas gaussianas aos perfis do feixe na entrada e na saída da fibra. A dispersão foi avaliada comparando o desvio padrão das curvas ajustadas: quanto maior o desvio padrão, maior a dispersão do feixe. Para cada uma das frequências analisadas, o raio do núcleo da fibra foi ajustado de forma a haver a propagação de um único modo. Nas Tabelas II, III a nomenclatura utilizada é a seguinte:

- σ_i^+ : desvio padrão do feixe à entrada da fibra, para a frequência de maior ganho ($freq^+$);
- σ_o^- : desvio padrão do feixe à saída, para a frequência de menor ganho ($freq^-$).

Em suma, a antena de platina apresentou uma diminuição da dispersão de aproximadamente 8% na frequência de menor ganho, constituindo uma exceção ao comportamento geral observado nas antenas de buracos. Por outro lado, nas antenas de ranhuras, a platina e o alumínio permitem uma redução significativa do desvio padrão do feixe. Em particular, o alumínio apresentou o melhor desempenho, com uma redução de 38.7% no desvio padrão.

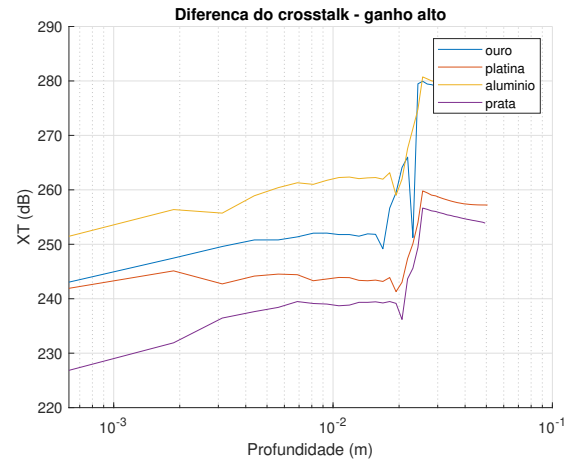


Figura 8. Frequências de maior ganho com nanoantenas de buracos.

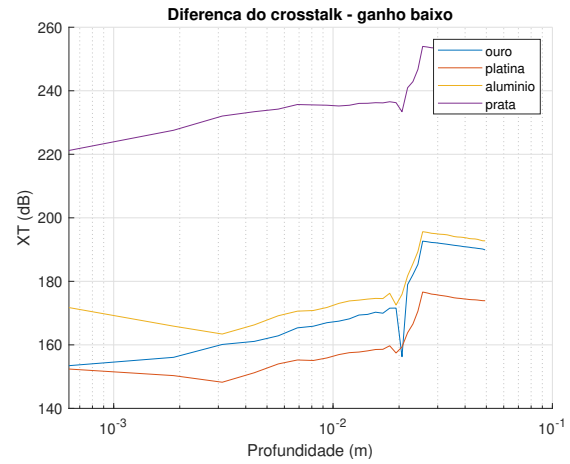


Figura 9. Frequências de menor ganho com nanoantenas de buracos.

VI. INCORPORAÇÃO DE NANOANTENAS EM FIBRAS MULTINÚCLEO

De seguida, analisa-se o impacto das nanoantenas no *crosstalk* de fibras multinúcleo. Foram considerados dois tipos de antenas: antenas transversais, inseridas transversalmente no núcleo da fibra, e antenas longitudinais, incorporadas no revestimento entre núcleos adjacentes ao longo do comprimento da fibra. Em cada um dos casos foram analisados os quatro materiais descritos na secção anterior nas frequências de maior e menor ganho. O raio do núcleo foi novamente ajustado de forma a haver apenas a propagação de um único modo.

A. Nanoantenas transversais

De forma a analisar o impacto das antenas transversais, são apresentados quatro gráficos que ilustram a evolução do *crosstalk* para os quatro materiais estudados, considerando, para cada um, as frequências de maior e de menor concentração.

As Figs. 8, 9, 10, 11 mostram que a introdução de uma nanoantena conduz, em todos os casos, a um aumento do *crosstalk*. Seguidamente, foi realizado um estudo com múltiplas nanoantenas no interior do núcleo, com o objetivo de analisar o seu impacto no *crosstalk*.

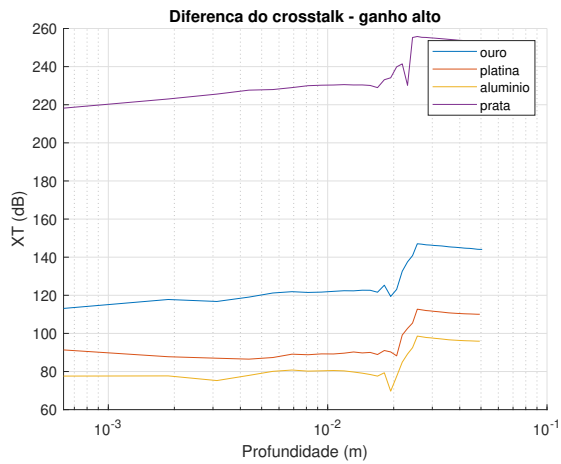


Figura 10. Frequências de maior ganho com nanoantenas de ranhuras.

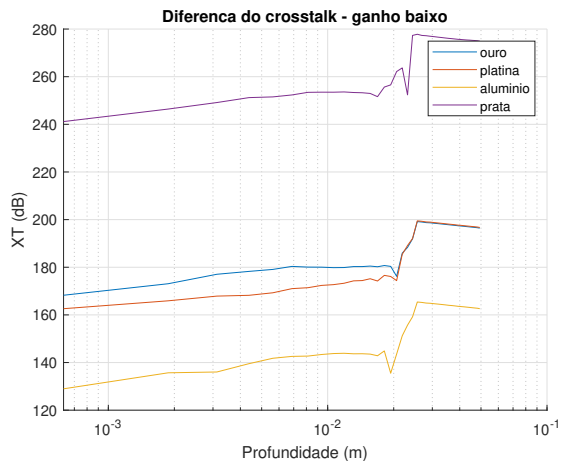


Figura 11. Frequências de menor ganho com nanoantenas de ranhuras.

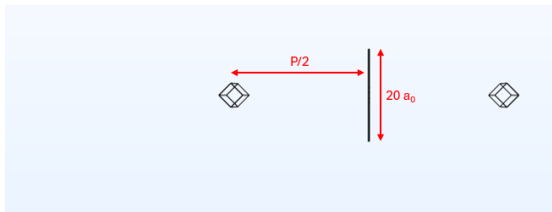


Figura 12. Estrutura de uma fibra de 2 núcleos com nanoantenas longitudinais.

B. Nanoantenas longitudinais

As Figs. 12 e 13 ilustram a disposição espacial da nanoantena no interior de uma fibra com 2 núcleos e de 3 núcleos, permitindo uma melhor compreensão da sua configuração analisada para as antenas longitudinais.

Em que P representa a distância entre os núcleos e a_0 é o espaçamento entre as aberturas da nanoantena. O *crosstalk* foi analisado no ponto correspondente ao comprimento máximo da fibra. Pela tabela IV observamos que na maioria dos casos há uma redução significativa do *crosstalk*, sendo que apenas a platina e o alumínio aumentam o *crosstalk* nas frequências de maior ganho. Na Tabela IV os resultados da Figura 12 são identificados com a nomenclatura de XT_2 e para a Fig. 13 é

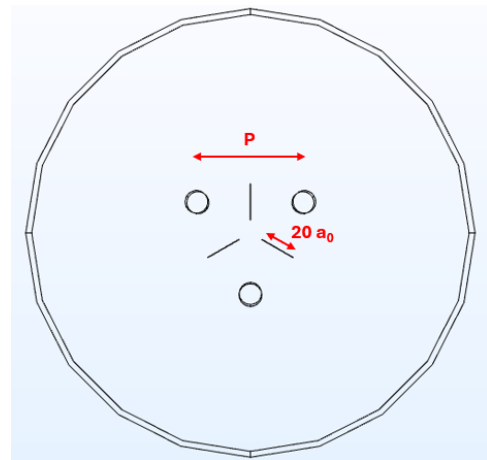


Figura 13. Estrutura de uma fibra de 3 núcleos com nanoantenas longitudinais.

Tabela IV
VARIAÇÃO DO CROSTALK ENTRE FIBRAS MCF COM E SEM NANOANTENAS.

Material	XT_2^+ (dB)	XT_2^- (dB)	XT_3^+ (dB)	XT_3^- (dB)
Ouro	-20,4	-74,9	-3,4	-44,3
Prata	-70,9	-68,2	-69,6	-106,8
Platina	+14,7	-43,7	-0,4	-0,4
Alumínio	+15,3	-64,5	+16,4	-26,3

utilizado XT_3 .

Entre os dois casos apresentados, vemos que a prata apresenta o maior potencial redutor de *crosstalk* dos 4 materiais analisados.

VII. CONCLUSÃO

O estudo do ganho das nanoantenas permitiu confirmar a existência de zonas de ganho extraordinário para os diversos materiais analisados. Em particular, a utilização de prata revelou-se especialmente eficaz, atingindo ganhos superiores a 5 em ambas as estruturas (buracos e ranhuras).

Os resultados mostraram que, na maioria dos casos, a introdução de nanoantenas contribui para a dispersão do feixe. No entanto, verificou-se que os materiais platina e alumínio podem promover a concentração do feixe em determinadas configurações. Destaca-se o caso da nanoantena de ranhuras em alumínio, que proporcionou uma redução de 39% no desvio padrão. Em comparação, a nanoantena de buracos no melhor caso reduziu a dispersão em 8%.

Com a configuração de fibras MCF com dois e três núcleos, foram realizados vários testes utilizando nanoantenas longitudinais entre cada par de núcleos. Os resultados obtidos demonstram que as antenas de ranhuras em prata reduzem de forma eficaz o *crosstalk*, com reduções que podem atingir os 100 dB. No caso do alumínio e da platina, o efeito sobre o *crosstalk* varia consoante a frequência, podendo tanto aumentá-lo como reduzi-lo perante o modelo de referência. De notar que nas bandas de comunicação ótica as nanoantenas longitudinais têm um efeito potenciador do *crosstalk*.

Posteriormente, foi realizada uma análise da utilização de nanoantenas transversais em fibras com sete núcleos. Os

resultados obtidos indicam que, em configurações com um maior número de núcleos, o aumento do *crosstalk* devido à introdução das antenas é menos acentuado. No entanto, a colocação de antenas de buracos em todos os núcleos não apresenta vantagens significativas em relação ao caso com apenas uma antena, no que diz respeito ao *crosstalk* global.

Concluindo, as nanoantenas longitudinais nas bandas óticas de comunicação não conseguem competir face à tecnologia TA-MCF, na maioria dos casos as nanoantenas levam a um aumento do *crosstalk*, com valores que variam consoante o material utilizado na antena. No entanto, as nanoantenas de ranhuras em ouro permitem reduções até 75 dB na região do visível, superando os 30 dB obtidos com a tecnologia TA-MCF.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., e, quando elegível, cofinanciado por fundos comunitários no âmbito do projeto/apoio UID/50008/2025 – Instituto de Telecomunicações.

REFERÊNCIAS

- [1] R. F. L. S. Costa, “Unidades de meios técnicos policiais: PSP - estrutura, resposta e futuro,” 2019. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10400.26/34992>
- [2] G. Portugal, “Governo aprova regulamentação das regras de utilização das Câmaras Portáteis de Uso Individual (bodycams) pelos agentes das forças de segurança.” [Online]. Available: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc23/comunicacao/comunicado?i=governo-aprova-regulamentacao-das-regras-de-utilizacao-das-camaras-portateis-de-uso-individual-bodycams-pelos-agentes-das-forcas-de-seguranca>
- [3] M. Mikulic and B. Modlic, “General system architecture of TETRA network for public safety services,” in *2008 50th International Symposium ELMAR*, vol. 1, Sep. 2008, pp. 207–210, iSSN: 1334-2630. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4747472>
- [4] G. Rademacher, R. S. Luís, B. J. Puttnam, Y. Awaji, and N. Wada, “Crosstalk dynamics in multi-core fibers,” *Optics Express*, vol. 25, no. 10, pp. 12 020–12 028, May 2017, publisher: Optica Publishing Group. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-25-10-12020>
- [5] K. Saitoh, M. Koshiba, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Crosstalk and Core Density in Uncoupled Multicore Fibers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 21, pp. 1898–1901, Nov. 2012. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6296690>
- [6] K. Takenaga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber,” in *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Mar. 2011, pp. 1–3. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5875695>
- [7] H. Ono, M. Yamada, K. Takenaga, S. Matsuo, Y. Abe, K. Shikama, and T. Takahashi, “Amplification method for crosstalk reduction in multi-core fibre amplifier,” *Electronics Letters*, vol. 49, no. 2, pp. 138–140, 2013, eprint: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/el.2012.4307>. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/el.2012.4307>
- [8] K. Morita and K. Hirata, “Dynamic spectrum allocation method for reducing crosstalk in multi-core fiber networks,” in *2017 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Jan. 2017, pp. 686–688. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7899583>
- [9] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 1st ed. Wiley, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119737391>
- [10] W. Chen, L. Yuan, B. Zhang, Q. Yu, Z. Lian, Y. Pi, C. Shan, and P. P. Shum, “Applications and Development of Multi-Core Optical Fibers,” *Photonics*, vol. 11, no. 3, p. 270, Mar. 2024, number: 3 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2304-6732/11/3/270>
- [11] K. Singh and G. Kaur, “Multi-Core Fibers: An Overview,” 2013.
- [12] A. V. T. Cartaxo and T. M. F. Alves, “Discrete Changes Model of Inter-core Crosstalk of Real Homogeneous Multi-core Fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 12, pp. 2398–2408, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7814214>
- [13] A. Joshi, I. Sharma, and P. K. Krishnamurthy, “Semi-analytical approach for calculation of intercore crosstalk in multicore fibers,” *Optical Fiber Technology*, vol. 60, p. 102366, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520020303564>
- [14] F. Ye, J. Tu, K. Saitoh, and T. Morioka, “Simple analytical expression for crosstalk estimation in homogeneous trench-assisted multi-core fibers,” *Optics Express*, vol. 22, no. 19, pp. 23 007–23 018, Sep. 2014, publisher: Optica Publishing Group. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-19-23007>
- [15] A. E. Krasnok, I. S. Maksymov, A. I. Denisjuk, P. A. Belov, A. E. Miroschnichenko, C. R. Simovski, and Y. S. Kivshar, “Optical nanoantennas,” *Physics-Uspekhi*, vol. 56, no. 6, p. 539, Jun. 2013, publisher: IOP Publishing. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.3367/UFNe.0183.201306a.0561/meta>
- [16] Y. Zhao and A. Alù, “Optical nanoantennas and their applications,” in *2013 IEEE Radio and Wireless Symposium*, Jan. 2013, pp. 58–60, iSSN: 2164-2974. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6486640>
- [17] F. Duarte, J. P. N. Torres, A. Baptista, and R. A. Marques Lameirinhas, “Optical Nanoantennas for Photovoltaic Applications,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 2, p. 422, Feb. 2021, number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-4991/11/2/422>
- [18] I. Kavankova, “Review of Nanoantennas Application,” *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, no. 1, pp. 15–19, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://sigma-not.pl/publikacja-141349-2023-1.html>
- [19] J. L. Stokes, Y. Yu, Z. H. Yuan, J. R. Pugh, M. Lopez-Garcia, N. Ahmad, and M. J. Cryan, “Analysis and design of a cross dipole nanoantenna for fluorescence-sensing applications,” *JOSA B*, vol. 31, no. 2, pp. 302–310, Feb. 2014, publisher: Optica Publishing Group. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-31-2-302>
- [20] I. S. Maksymov, I. Staude, A. E. Miroschnichenko, and Y. S. Kivshar, “Optical Yagi-Uda nanoantennas,” *Nanophotonics*, vol. 1, no. 1, pp. 65–81, Jul. 2012, publisher: De Gruyter. [Online]. Available: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/nanoph-2012-0005/html>
- [21] K. A. Bachman, J. J. Peltzer, P. D. Flammer, T. E. Furtak, R. T. Collins, and R. E. Hollingsworth, “Spiral plasmonic nanoantennas as circular polarization transmission filters,” *Optics Express*, vol. 20, no. 2, pp. 1308–1319, Jan. 2012, publisher: Optica Publishing Group. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-20-2-1308>
- [22] R. A. Marques Lameirinhas, C. P. Correia V. Bernardo, J. P. N. Torres, A. Baptista, and M. J. Marques Martins, “Metallic nanostructures inclusion to improve energy harvesting in silicon,” *Optical Materials: X*, vol. 22, p. 100298, May 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259014782400010X>