

# Biossensores plasmônicos: usando luz e nanoestruturas para encontrar biomarcadores

Jhonattan C. Ramirez<sup>1</sup>, Jorge R. Mejía-Salazar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG);

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL)

[jcordoba@cpdee.ufmg.br](mailto:jcordoba@cpdee.ufmg.br) e [jrmejia@inatel.br](mailto:jrmejia@inatel.br)

**RESUMO:** A detecção de quantidades extremamente pequenas de biomoléculas, de forma rápida e confiável, é um desafio central em áreas como o diagnóstico médico, monitoramento ambiental e controle de qualidade de alimentos. Nesse contexto, os biossensores ópticos têm se destacado por sua capacidade de traduzir interações moleculares em mudanças mensuráveis na luz. Entre essas tecnologias, os biossensores plasmônicos chamam a atenção por concentrar campos eletromagnéticos em escalas nanométricas, o que aumenta significativamente a sensibilidade dos dispositivos. Este trabalho apresenta e discute uma plataforma plasmônica recentemente demonstrada que combina dois tipos de interação luz-matéria: ressonâncias localizadas em nanoestruturas metálicas e modos que se propagam ao longo de superfícies metálicas. Quando esses dois modos interagem de forma intensa, surge um novo comportamento coletivo, conhecido como anti-crossing, que permite um controle mais preciso da resposta óptica do sistema e aumenta sua sensibilidade a variações no ambiente. Resultados experimentais demonstram que essa abordagem pode alcançar sensibilidades até três ordens de grandeza superiores às de sensores plasmônicos convencionais. Esses resultados evidenciam como o desenho cuidadoso de nanoestruturas e o controle dos mecanismos de perda de energia podem ser explorados para otimizar o desempenho dos sensores. De forma geral, o trabalho ilustra como avanços em nanofotônica e plasmônica estão abrindo caminho para tecnologias de detecção cada vez mais sensíveis e versáteis.

**Palavras-chave:** Biossensores, Luz-matéria, Nanofotônica, Plasmônica, Sensoriamento Óptico.

**ABSTRACT:** Detecting extremely small amounts of biomolecules quickly and reliably is a major challenge in areas such as medical diagnostics, environmental monitoring, and food safety. Optical biosensors have emerged as a promising solution by translating molecular interactions into measurable changes in light. Among these technologies, plasmonic biosensors stand out for their ability to concentrate electromagnetic fields at the nanoscale, significantly enhancing detection sensitivity. In this work, we present and discuss a recently demonstrated plasmonic platform that combines two types of light-matter interactions: localized resonances in metallic nanostructures and propagating modes along metallic surfaces. When these two modes interact strongly, they give rise to hybrid states, a phenomenon known as anti-crossing. This effect enables improved control over the system's optical response and enhances its sensitivity to changes in the surrounding environment. Experimental results show that this approach can achieve sensitivities up to three orders of magnitude higher than conventional plasmonic sensors. These findings highlight how the careful design of nanostructures and the control of energy losses can be used to optimize sensor performance. Overall, this work illustrates how advances in nanophotonics and plasmonics are paving the way for more sensitive and versatile detection technologies.

**Keywords:** Biosensors, Nanophotonics, Optical Sensing, Plasmonics, Light-matter Interaction.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.21397997>



A capacidade de detectar rapidamente moléculas associadas a doenças, contaminações ambientais ou alterações na qualidade dos alimentos é um dos grandes desafios da ciência contemporânea. Em um mundo que demanda diagnósticos mais rápidos, acessíveis e precisos, os biossensores vêm ganhando destaque por transformar eventos biológicos, como a ligação entre uma proteína e um anticorpo ou entre duas fitas complementares de DNA, em sinais mensuráveis e interpretáveis. Esses dispositivos funcionam como tradutores entre o mundo molecular e o da informação. Quando uma molécula de interesse, chamada analito, se liga à superfície do sensor, essa interação provoca uma mudança física, química ou óptica. O papel do biossensor é converter essa mudança em um sinal detectável, permitindo identificar a presença do analito e, em muitos casos, estimar sua concentração. Entre as diferentes estratégias de detecção, os biossensores ópticos se destacam por monitorar alterações na propagação da luz [1].

Em vez de dependerem necessariamente de marcadores químicos adicionais, muitos desses dispositivos monitoram mudanças em propriedades como intensidade, comprimento de onda, fase ou índice de refração. Por isso, têm sido amplamente explorados em áreas como diagnóstico biomédico, monitoramento ambiental e controle de qualidade de alimentos. No contexto dos sensores ópticos, os dispositivos fotônicos ocupam uma posição especialmente promissora. Eles utilizam micro e nanoestruturas capazes de guiar, confinar ou intensificar a luz em regiões extremamente pequenas. Essa capacidade aumenta a interação entre a luz e as moléculas presentes na superfície do sensor, permitindo a detecção de quantidades muito baixas de biomarcadores. Em condições bem controladas, algumas plataformas ópticas já alcançam sensibilidade compatível com a detecção de moléculas individuais. No entanto, transformar esses avanços em aplicações da vida cotidiana ainda exige superar desafios importantes, como estabilidade, reprodutibilidade e desempenho em amostras reais [2].

Nos últimos anos, uma classe particular de dispositivos fotônicos tem recebido atenção crescente: os biossensores plasmônicos, baseados em nanoestruturas metálicas, geralmente feitas de ouro ou prata. Nesses materiais, a luz pode se acoplar às oscilações coletivas dos elétrons livres do metal, em um fenômeno conhecido como ressonância plasmônica de superfície. Quando isso ocorre, o campo eletromagnético fica fortemente concentrado nas proximidades da nanoestrutura, justamente na região onde



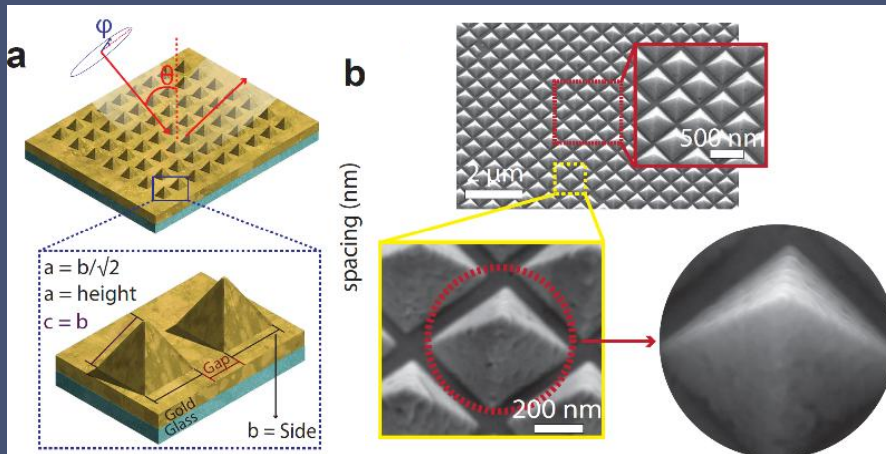
as moléculas de interesse podem se ligar. Como resultado, pequenas alterações no ambiente local, provocadas pela presença de uma proteína, um fragmento de DNA ou outro biomarcador, produzem mudanças ópticas detectáveis. É essa amplificação local da luz que torna os biossensores plasmônicos uma das plataformas mais promissoras para a detecção ultrasensível de biomoléculas. Seu potencial é particularmente relevante para o desenvolvimento de métodos de diagnóstico precoce, nos quais a quantidade de biomarcadores pode ser muito baixa, como ocorre em estágios iniciais de algumas doenças [1,3].

Em muitas arquiteturas de biossensores plasmônicos, utilizam-se nanopartículas metálicas nas quais os campos eletromagnéticos são fortemente confinados. Essas nanopartículas se comportam como nanoantenas, capazes de espalhar ou reirradiar a luz para o meio externo. Sua resposta a mudanças no índice de refração costuma ser muito intensa, o que as torna plataformas de detecção altamente eficientes. No entanto, os campos eletromagnéticos associados a essas estruturas ficam confinados a uma região extremamente fina próxima à superfície das partículas. Isso pode limitar sua resposta no caso de moléculas relativamente grandes ou de moléculas que não estejam aderidas exatamente à região da nanopartícula onde ocorre a maior amplificação de campo. Por outro lado, existe uma abordagem alternativa em que as ressonâncias plasmônicas não se comportam como antenas de campos localizados, mas se propagam ao longo das interfaces entre um metal e um dielétrico. Nessas estruturas, o campo costuma se distribuir por uma região mais extensa da superfície metálica do que nas nanopartículas, o que pode facilitar a detecção. Porém, as curvas de refletância utilizadas na medição tendem a ser largas e podem se sobrepor de forma significativa diante de variações muito pequenas na concentração do analito. Com isso, surge um problema de resolução que dificulta a identificação de pequenas mudanças na resposta óptica do sensor [1,2].

Para contornar esse problema, foram desenvolvidos recentemente biossensores que utilizam pirâmides de ouro fabricadas sobre filmes de ouro, permitindo a coexistência de plásmons localizados, associados ao comportamento de nanoantena das pirâmides, e plásmons propagantes, associados à superfície metálica [2]. Com isso, busca-se combinar as melhores características de ambas as abordagens. De fato, mais

do que coexistirem de forma independente, esses estados podem hibridizar-se na estrutura desenvolvida, isto é, formar estados resultantes da mistura dos dois tipos de modos presentes no sistema [4]. A estrutura desenvolvida é apresentada na Figura 1, que ilustra, na subfigura 1a, um esquema de um arranjo de estruturas piramidais e, na subfigura 1b, a imagem SEM das estruturas fabricadas. Essa configuração foi fundamental para viabilizar a investigação experimental das propriedades ópticas decorrentes da interação entre modos plasmônicos localizados e propagantes [4].

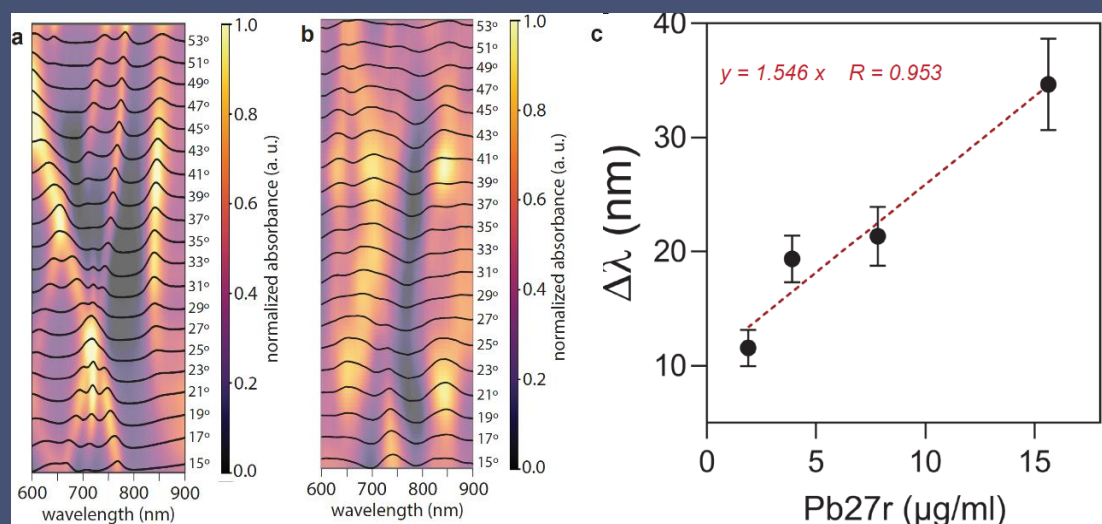
O avanço mais relevante nesse cenário é a demonstração experimental do regime de acoplamento forte entre modos plasmônicos localizados (LSPR) e modos plasmônicos propagantes (SPP), um fenômeno conhecido como *anti-crossing*.



**Figura 1:** (a) Esquemático de um *array* de estruturas piramidais de ouro sobre um filme de ouro, evidenciando a configuração projetada para promover a coexistência e hibridização de modos plasmônicos localizados e propagantes [4]. (b) Imagem de microscopia eletrônica de varredura (SEM) das estruturas piramidais fabricadas, confirmando a morfologia e distribuição do *array* [4].

Nesse regime, ocorre a formação de modos híbridos cujas propriedades ópticas, como a largura espectral e a intensidade do campo eletromagnético, tornam-se altamente sensíveis ao ambiente local. O trabalho apresentado fornece uma prova de conceito robusta ao avaliar experimentalmente o Limite de Detecção (LOD) desses dispositivos, alcançando uma sensibilidade de 1.546 nm/ $\mu\text{g/mL}$ , valor aproximadamente três ordens de magnitude superior ao obtido em sistemas convencionais baseados apenas em LSPR [4].

Do ponto de vista físico, o regime de *anti-crossing* emerge do acoplamento forte entre modos distintos e caracteriza-se pela abertura de uma lacuna espectral (*splitting*), observável e quantificável experimentalmente. Esse comportamento só se manifesta quando há um equilíbrio adequado entre as taxas de perdas radiativas ( $\gamma_{rad}$ ) e intrínsecas ( $\gamma_{int}$ ), o que permite uma troca eficiente de energia entre os modos acoplados [5]. Conforme demonstrado no trabalho supracitado, o ajuste fino de parâmetros estruturais, em particular a geometria das nanoestruturas metálicas, possibilita controlar a largura dessa lacuna espectral e, conseqüentemente, otimizar o Limite de Detecção (LOD) do sensor. Nesse contexto, a engenharia precisa dos mecanismos de dissipação, aliada à caracterização experimental sistemática do dispositivo, constitui uma estratégia central para o desenvolvimento racional de biossensores plasmônicos de alta sensibilidade [5], [6].



**Figura 2:** a) A resposta espectral medida para a rede de nanopartículas piramidais revela uma interação ajustável de acoplamento *plasmon-polariton* de superfície (SPP), fortemente dependente da ressonância plasmônica de superfície localizada (LSPR) em 850 nm. Um fenômeno de duplo anticruzamento é observado próximo a 725 nm, atribuído à interação entre dois modos LSPR e uma onda SPP. Além disso, nota-se um confinamento pronunciado no modo LSPR azul-deslocado, cuja energia aumenta progressivamente com o aumento do ângulo de incidência, em torno de 633 nm [4].

b) A mesma resposta espectral é observada para a rede de nanopartículas piramidais com albumina adsorvida na superfície do dispositivo, mantendo o comportamento ajustável de acoplamento SPP e o duplo anticruzamento próximo de 725 nm, porém com características espectrais modificadas pela presença da camada proteica.

c) A medição do  $\Delta\lambda$  em função da concentração da proteína PB27R permite a obtenção do limite de detecção (LOD) do sensor, evidenciando sua sensibilidade para interações biomoleculares.



Embora outras formas de interação, como os acoplamentos plasmon–fônon e plasmon–éxciton, apresentem grande potencial e ampliem o espectro de aplicações desses dispositivos, ainda carecem de demonstrações experimentais sistemáticas e de avaliações quantitativas voltadas ao sensoriamento. O avanço nessas direções dependerá de estudos futuros que integrem modelagem teórica detalhada e validação experimental rigorosa, com foco na análise de desempenho em condições realistas de detecção óptica.

## **AGRADECIMENTOS**

J.C.R., agradece o apoio financeiro através dos projetos Finep (SibratecNano, 01.13.0357.00, 0513/22), Fapemig (APQ-01602-21, APQ-02286-23, APQ-05305-23, APQ-00822-19), assim como também as instalações da UFMG (LCPNano e Centro de Microscopia), ao INCT IQNano, à CAPES e ao CNPq.

J.R.M.-S. agradece o apoio financeiro através dos projetos XGM-AFCCT-2024-3-1-1, apoiado pelo xGMobile – Centro de Competência EMBRAPII-Inatel em Redes 5G e 6G, com recursos financeiros do PPI IoT/Manufatura 4.0 do MCTI (contrato nº 052/2023) assinado com a EMBRAPII. Os autores também agradecem o apoio financeiro das agências brasileiras Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq (308068/2025-4; 405014/2025-2), FAPEMIG (APQ-02782-25) e Finep (1060/24).



## REFERÊNCIAS

- [1] Ramirez, J. C.; Ramirez-priego, P.; Lechuga, L. M. The Next Generation of Plasmonic Biosensors. *IEEE Sensors Rev.* 2026, 3 (March), 314–322. <https://doi.org/10.1109/SR.2026.3667091>.
- [2] Teixeira, *et al.*, “Advanced Computational Techniques for Plasmonic Metasurfaces in the Detection of Neglected Infectious Diseases”, *Anal. Chem.* 2025. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c04934>.
- [3] Sepúlveda, B.; Angelomé, P. C.; Lechuga, L. M.; Liz-Marzán, L. M. LSPR-Based Nanobiosensors. *Nano Today* 2009, 4 (3), 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2009.04.001>.
- [4] Marques, *et al.*, “Tunable Surface Plasmon-Polaritons Interaction in All-Metal Pyramidal Metasurfaces: Unveiling Principles and Significance for Biosensing Applications”, *ACS Appl. Opt. Mater.*, 2(7), 2024, 1374–1381. <https://doi.org/10.1021/acsaom.4c00170>.
- [5] Aigner, *et al.*, “Optical Control of Resonances in Temporally Symmetry-Broken Metasurfaces”, *Nature*, 644, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09363-7>.
- [6] Aigner, *et al.*, “Plasmonic Bound States in the Continuum to Tailor Light-Matter Coupling”, *Sci. Adv.*, 8 (49), 2022, 1–8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add4816>.