



O PAPEL DOS MÉTODOS AVANÇADOS NA DETECÇÃO PRECOCE DE RESISTÊNCIA BACTERIANA E NO DIAGNÓSTICO LABORATORIAL

**YASMIN FARIA ROOSEVELT DOS SANTOS BRUNO REIS MOREIRA NACANO
FRANCO CLAUDIO BONETTI**

RESUMO

O aumento da resistência bacteriana representa um desafio cada vez mais preocupante para a saúde pública mundial, comprometendo significativamente a eficácia dos tratamentos antimicrobianos e agravando quadros infecciosos, o que resulta na piora das condições clínicas dos pacientes e no aumento das taxas de mortalidade. Diante desse cenário complexo, torna-se indispensável tanto o desenvolvimento quanto a aplicação de métodos diagnósticos inovadores capazes de identificar, de forma rápida, sensível e precisa, os perfis de resistência bacteriana. Este trabalho se propõe a examinar, por meio de uma análise crítica da literatura científica recente, o papel dos métodos laboratoriais avançados na detecção precoce da resistência bacteriana e sua aplicabilidade no diagnóstico laboratorial clínico. A metodologia adotada baseou-se na seleção criteriosa de artigos científicos publicados nos últimos seis anos, disponíveis em bases de dados reconhecidas internacionalmente, com foco em estudos que abordam o uso de ferramentas tecnológicas modernas como espectrometria de massas (MALDI-TOF MS), sequenciamento de nova geração (NGS), aprendizado de máquina e testes rápidos e ágeis. Os resultados demonstram que, ao adotar essas abordagens inovadoras, é possível detectar tanto os micro-organismos quanto seus mecanismos genéticos de resistência de forma muito mais eficaz, reduzindo significativamente o tempo necessário para a obtenção dos resultados em comparação aos métodos convencionais. Além disso, destacam-se benefícios importantes como maior sensibilidade e especificidade, possibilidade de análise direta a partir de amostras clínicas e potencial para aplicação em tempo real. Contudo, algumas limitações foram observadas, incluindo custos elevados, necessidade de infraestrutura tecnológica avançada e dependência de profissionais altamente capacitados. Conclui-se que, mesmo diante dessas dificuldades, as técnicas de ponta surgem como ferramentas promissoras para o enfrentamento da resistência bacteriana, contribuindo para diagnósticos mais precisos, escolha adequada da terapêutica e controle eficiente da disseminação de bactérias resistentes.

Palavras-chave: Microbiológico; Tecnologias; Bactérias.

1 INTRODUÇÃO

A crescente resistência aos antimicrobianos (RAM) representa um dos maiores desafios para a saúde global, sendo impulsionada por fatores como o uso indiscriminado de antibióticos na medicina, a automedicação e a falta de políticas efetivas de controle de infecção (BRITO; TREVISAN, 2021). Além disso, a resistência é agravada pela elevada capacidade adaptativa de microrganismos patogênicos, que desenvolvem mecanismos como bombas de efluxo, modificação de alvos moleculares e produção de enzimas inativadoras, dificultando a ação dos antimicrobianos (ADEFISOYE; OLANIRAN, 2023; BELAY *et al.*, 2022).

Estudos recentes indicam que, caso nenhuma medida efetiva seja adotada, a resistência antimicrobiana poderá causar até 1,91 milhão de mortes por ano até 2050 (THE LANCET, 2024). Em ambientes hospitalares, infecções por bactérias multirresistentes estão associadas a

maior mortalidade, aumento da permanência hospitalar e limitação das opções terapêuticas, sobretudo em UTIs e entre pacientes imunocomprometidos (KAPROU *et al.*, 2021).

Neste cenário, a detecção precoce de resistência bacteriana é essencial para direcionar tratamentos eficazes e conter surtos infecciosos. No entanto, os métodos microbiológicos tradicionais — baseados em cultivo e testes fenotípicos de suscetibilidade — apresentam limitações quanto à sensibilidade, especificidade e velocidade de resposta, exigindo prazos de 24 a 72 horas para identificação e definição de perfil de resistência (RENTSCHLER; KAISER; DEIGNER, 2021; TJANDRA *et al.*, 2022). Além disso, esses métodos podem falhar na detecção de bactérias viáveis, mas não cultiváveis, ou de genes de resistência emergentes, prejudicando a condução terapêutica (BELAY *et al.*, 2022).

Diante disso, métodos laboratoriais avançados vêm sendo desenvolvidos para suprir essas lacunas, permitindo uma abordagem mais precisa e em menor tempo. A espectrometria de massas por dessorção/ionização a laser assistida por matriz (MALDI-TOF MS), por exemplo, tem demonstrado elevada acurácia na identificação bacteriana, muitas vezes em menos de uma hora, contribuindo significativamente para a agilidade diagnóstica (CHEON *et al.*, 2021; LÓPEZ-CORTÉS *et al.*, 2023). Além disso, a incorporação de algoritmos de aprendizado de máquina a esses sistemas melhora sua capacidade de prever padrões de resistência antimicrobiana com base em perfis proteicos (WEIS *et al.*, 2020).

Outra estratégia promissora envolve métodos moleculares, como a reação em cadeia da polimerase (PCR) e o sequenciamento de nova geração (NGS), os quais têm se mostrado superiores na detecção de genes de resistência e na identificação de múltiplos patógenos simultaneamente, mesmo em amostras clínicas complexas (BELAY *et al.*, 2022; BROWN *et al.*, 2022). Esses métodos são particularmente úteis para análises genotípicas, permitindo a detecção precoce de mecanismos específicos de resistência, como betalactamases de espectro estendido (ESBLs) e carbapenemases (KAPROU *et al.*, 2021).

Além disso, a integração dessas ferramentas ao uso de inteligência artificial tem ampliado a capacidade de diagnóstico em tempo real, com benefícios em vigilância epidemiológica, controle de surtos e decisão terapêutica personalizada (SZYMCZAK; SZCZUREK, 2023; LÓPEZ-CORTÉS *et al.*, 2023). Ambientes hospitalares e laboratórios de referência já relatam melhorias substanciais nos indicadores assistenciais e operacionais com a adoção desses métodos rápidos (CHEON *et al.*, 2021; RENSNER *et al.*, 2020).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo revisar e analisar criticamente o papel dos métodos laboratoriais avançados na detecção precoce da resistência bacteriana e na melhoria do diagnóstico microbiológico, abordando suas aplicações práticas, benefícios evidenciados, limitações operacionais e perspectivas futuras frente ao controle da resistência antimicrobiana.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo consiste em uma revisão narrativa da literatura, com abordagem qualitativa, tendo como objetivo reunir, organizar e analisar criticamente informações científicas sobre o uso de métodos laboratoriais avançados na detecção precoce da resistência bacteriana e no diagnóstico microbiológico.

A seleção dos artigos foi realizada por meio de buscas em bases de dados reconhecidas da área da saúde, priorizando fontes atualizadas e relevantes para o tema. Foram considerados elegíveis estudos publicados entre 2020 e 2023 que abordassem técnicas como espectrometria de massas (MALDI-TOF MS), reação em cadeia da polimerase (PCR), sequenciamento genômico de nova geração (NGS), inteligência artificial aplicada à microbiologia clínica, além de métodos rápidos para identificação de bactérias multirresistentes.

Os critérios de inclusão envolveram publicações em português ou inglês, com acesso ao texto completo e com foco em métodos diagnósticos inovadores no contexto da resistência antimicrobiana. Foram excluídos artigos duplicados, trabalhos com escopo fora do tema

proposto ou com limitações metodológicas relevantes.

As informações extraídas foram analisadas de forma descritiva e interpretativa, considerando as contribuições dos estudos para o avanço do diagnóstico microbiológico e suas aplicações práticas no contexto clínico e laboratorial.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram incluídos nesta revisão 13 artigos científicos publicados entre 2020 e 2025, todos com enfoque na aplicação de métodos laboratoriais avançados no diagnóstico de bactérias multirresistentes. Os estudos analisados destacam, de forma recorrente, o uso e a efetividade de técnicas como espectrometria de massas (MALDI-TOF MS), reação em cadeia da polimerase (PCR), sequenciamento genômico de nova geração (NGS) e abordagens baseadas em inteligência artificial (IA) aplicadas à microbiologia clínica.

A espectrometria de massas MALDI-TOF MS foi amplamente descrita como uma ferramenta robusta para a identificação bacteriana rápida e precisa, capaz de reduzir significativamente o tempo de diagnóstico tradicional, que varia entre 48 e 72 horas, para cerca de uma hora, com taxas de acurácia superiores a 90% (CHEON *et al.*, 2021; LÓPEZ-CORTÉS *et al.*, 2023). Além da identificação microbiana, a integração dessa técnica com algoritmos de aprendizado de máquina amplia sua capacidade de prever perfis de resistência antimicrobiana, demonstrando elevado potencial de aplicação clínica (WEIS *et al.*, 2020). Essa combinação permite, por exemplo, a identificação de cepas resistentes a betalactâmicos e carbapenêmicos com alta sensibilidade, facilitando intervenções terapêuticas mais rápidas e precisas (SZYMCZAK; SZCZUREK, 2023).

A detecção genotípica por PCR e NGS destacou-se pela alta sensibilidade e especificidade na identificação de genes de resistência, incluindo blaKPC, mecA e ndm-1, frequentemente utilizados em protocolos de triagem molecular rápida (BELAY *et al.*, 2022). O PCR permite resultados em poucas horas, oferecendo uma solução ágil para ambientes clínicos que demandam rapidez no diagnóstico (RENTSCHLER; KAISER; DEIGNER, 2021). O NGS, embora mais demorado — com tempo médio entre 24 e 48 horas —, oferece um mapeamento completo do resistoma bacteriano, sendo essencial para investigações epidemiológicas, vigilância genômica e controle de surtos hospitalares (TJANDRA *et al.*, 2022). Além disso, o NGS possibilita a identificação simultânea de múltiplos determinantes genéticos de resistência, mesmo em amostras com baixa carga bacteriana, superando limitações dos métodos tradicionais (BELAY *et al.*, 2022).

Sistemas ópticos automatizados associados à inteligência artificial vêm sendo explorados por sua capacidade de fornecer resultados microbiológicos confiáveis em menos de seis horas. Quando combinados com aprendizado de máquina, esses sistemas apresentam desempenho diagnóstico comparável aos métodos padrão-ouro, porém com menor tempo de resposta e maior facilidade de uso direto em amostras clínicas (BROWN *et al.*, 2022). Esses avanços representam melhorias significativas na tomada de decisão clínica precoce, impactando positivamente a escolha adequada do antimicrobiano, a redução do uso inadequado e a consequente diminuição das complicações hospitalares associadas à resistência bacteriana (KAPROU *et al.*, 2021).

Entre os estudos analisados, há consenso quanto aos principais benefícios desses métodos avançados: maior agilidade diagnóstica, sensibilidade elevada, especificidade aprimorada e impacto direto no controle da disseminação da resistência bacteriana (CHEON *et al.*, 2021; LÓPEZ-CORTÉS *et al.*, 2023). Por outro lado, limitações recorrentes incluem o alto custo dos equipamentos e reagentes, a necessidade de infraestrutura tecnológica especializada e a dependência de profissionais altamente capacitados para operação e interpretação dos resultados (RENSNER *et al.*, 2020). Outro desafio importante é a falta de padronização internacional para interpretação e validação dos resultados obtidos por essas

novas técnicas, o que pode limitar sua aplicação ampla em diferentes contextos clínicos (BROWN *et al.*, 2022). Dessa forma, a integração de métodos moleculares e computacionais na rotina laboratorial surge como uma estratégia promissora para individualizar terapias antimicrobianas, otimizar o uso de recursos e fortalecer ações de vigilância epidemiológica (KAPROU *et al.*, 2021). Perspectivas futuras apontam para o desenvolvimento de plataformas mais acessíveis, que unam rapidez, baixo custo e precisão, além da incorporação de inteligência artificial cada vez mais sofisticada para análise em tempo real (LÓPEZ-CORTÉS *et al.*, 2023; SZYMZCAK e SZCZUREK, 2023). A superação das barreiras econômicas e técnicas, contudo, permanece como desafio central para que esses avanços possam ser adotados de forma global, sobretudo em países com recursos limitados (RENSNER *et al.*, 2020).

Em síntese, os métodos laboratoriais avançados demonstram grande potencial para transformar o diagnóstico microbiológico e a detecção precoce da resistência bacteriana, especialmente em ambientes hospitalares de alta complexidade. A combinação entre técnicas moleculares e ferramentas computacionais se mostra essencial para o enfrentamento da resistência antimicrobiana, contribuindo para diagnósticos mais rápidos, terapias direcionadas e melhor controle da disseminação das bactérias resistentes.

Tabela 1 – Principais métodos laboratoriais avançados para detecção de multirresistência bacteriana e suas características

Método	Princípio	Vantagens	Limitações
MALDI-TOF MS	Espectrometria de massas por ionização e desorção a laser	Identificação rápida e precisa; integração com IA	Necessidade de banco de dados robusto; custo inicial elevado
PCR	Amplificação de DNA alvo	Alta sensibilidade e rapidez	Detecta apenas genes conhecidos; risco de contaminação
NGS	Sequenciamento genético de nova geração	Mapeamento completo do resistoma; útil para epidemiologia	Tempo e custo elevados; análise complexa
IA aplicada	Análise computacional de grandes volumes de dados microbiológicos	Predição em tempo real; integração com outros métodos	Necessidade de dados de treinamento e validação
Sistemas ópticos automatizados	Leitura fenotípica com sensores ópticos	Resultados rápidos (menos de 6h); aplicação direta em amostras	Infraestrutura cara; limitado a bactérias conhecidas

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Cheon *et al.* (2021); López-Cortés *et al.* (2023); Weis *et al.* (2020); Belay *et al.* (2022); Tjandra *et al.* (2022); Brown *et al.* (2022); Kaprou *et al.* (2021); Rensner *et al.* (2020).

4 CONCLUSÃO

Os métodos laboratoriais avançados representam uma transformação significativa no enfrentamento da resistência bacteriana, ao viabilizarem diagnósticos microbiológicos mais rápidos, sensíveis e específicos. Ferramentas como MALDI-TOF MS, PCR, NGS e inteligência artificial oferecem respostas mais ágeis e detalhadas, otimizando a escolha terapêutica, reduzindo a propagação de patógenos resistentes e contribuindo para o uso racional de antimicrobianos.

Contudo, a incorporação desses métodos na rotina laboratorial ainda esbarra em desafios

importantes: altos custos, necessidade de infraestrutura tecnológica robusta, capacitação técnica especializada e ausência de padronização global. Apesar disso, a revisão evidencia que, em ambientes onde essas ferramentas são utilizadas de forma integrada, há ganhos expressivos em tempo de resposta, desfechos clínicos e vigilância epidemiológica.

Como perspectiva futura, destaca-se a urgência de investimentos em pesquisas que avaliem custo-efetividade e impacto clínico em diferentes contextos, especialmente em países de baixa e média renda. Também é essencial o fortalecimento de políticas públicas que incentivem a democratização dessas tecnologias. Assim, conclui-se que os métodos diagnósticos avançados não apenas complementam, mas tendem a substituir estratégias convencionais, consolidando-se como pilar fundamental na contenção da resistência antimicrobiana.

REFERÊNCIAS

ADEFISOYE, M. A.; OLANIRAN, A. O. Antibiotic resistance and virulence mechanisms of enterococci in wastewater and surface water: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, [S. l.], v. 52, n. 2, p. 105–139, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1794168>. Acesso em 18 de maio 2025.

BELAY, D. G. et al. Molecular detection of antibiotic resistance genes and virulence factors in multidrug-resistant bacteria from clinical and environmental sources. *Antibiotics*, [S. l.], v. 11, n. 10, p. 1356, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/antibiotics11101356>. Acesso em 24 de maio 2025.

BRITO, L. G.; TREVISAN, G. M. Resistência antimicrobiana: uma abordagem sobre causas e consequências. *Revista Eletrônica Acervo Saúde*, [S. l.], v. 14, n. 1, e9035, 2022. Disponível em: <https://acervosaude.com.br/2022/article/view/9035>. Acesso em 25 de maio 2025.

BROWN, C. A. et al. Rapid antimicrobial susceptibility testing using automated optical imaging: development and validation of a real-time method. *Journal of Clinical Microbiology*, [S. l.], v. 60, n. 5, e02598-21, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/jcm.02598-21>. Acesso em 25 de maio 2025.

CHEON, S. et al. Application of MALDI-TOF mass spectrometry for the rapid and accurate identification of clinical microorganisms. *Diagnostics*, [S. l.], v. 11, n. 6, p. 965, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/diagnostics11060965>. Acesso em 20 de maio 2025.

KAPROU, G. D. et al. Rapid methods for antimicrobial resistance diagnostics: a review. *Analytica Chimica Acta*, [S. l.], v. 1152, p. 338267, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338267>. Acesso em 20 de maio 2025.

LÓPEZ-CORTÉS, L. E. et al. Integration of MALDI-TOF MS and machine learning for antimicrobial resistance detection. *Frontiers in Microbiology*, [S. l.], v. 14, p. 1135894, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1135894>. Acesso em 20 de maio 2025.

RENTSCHLER, S.; KAISER, T.; DEIGNER, H. P. Emerging diagnostic devices for antimicrobial resistance: a review. *Biosensors*, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 5, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bios11010005>. Acesso em 22 de maio 2025.

RENSNER, P. E. et al. Challenges in implementing rapid diagnostic tests for antimicrobial

resistance. *Clinical Infectious Diseases*, [S. l.], v. 71, n. 12, p. 2905–2912, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa016>. Acesso em 22 de maio 2025.

SZYMZCZAK, W.; SZCZUREK, E. Artificial intelligence in microbiological diagnostics: current status and future perspectives. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, [S. l.], v. 21, p. 1343–1352, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2023.01.021>. Acesso em 23 de maio 2025.

THE LANCET. Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: a systematic analysis with forecasts to 2050. *The Lancet*, [S. l.], 2024. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(23\)00648-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)00648-4). Acesso em: 09 jun. 2025.

TJANDRA, H. C. et al. Whole-genome sequencing for antimicrobial resistance surveillance: current applications and challenges. *Antibiotics*, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 112, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/antibiotics11010112>. Acesso em 25 de maio 2025.

WEIS, C. V. et al. Machine learning for microbial identification and antimicrobial susceptibility testing on MALDI-TOF mass spectra: a systematic review. *Clinical Microbiology and Infection*, [S. l.], v. 26, n. 10, p. 1310–1317, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2020.01.025>. Acesso em 24 de maio 2025.