

Cardiologia Nuclear: da Consolidação à Integração

Nuclear Cardiology: From Consolidation to Integration

Simone Cristina Soares Brandão^{1,2} 

Universidade Federal de Pernambuco,¹ Recife, PE – Brazil

Brigham and Women's Hospital, Harvard Medical School,² Boston, MA – EUA

Introdução

A cardiologia nuclear passou por uma transformação profunda ao longo da última década.¹⁻⁵ O que antes era predominantemente uma ferramenta diagnóstica focada na detecção de isquemia evoluiu para uma plataforma abrangente de compreensão fisiológica, estratificação de risco e cuidado cardiovascular de precisão.^{2,6-12} Nesse contexto, a área deixou de simplesmente identificar a doença para elucidar os seus mecanismos subjacentes, ecoando a percepção de Marie Curie de que “nada na vida deve ser temido, apenas compreendido”.

O ano de 2025 não se destacou por descobertas disruptivas isoladas, mas por algo igualmente relevante: a consolidação clínica.^{1,2,13} Nesse período, conceitos emergentes amadureceram e se transformaram em paradigmas clínicos aplicáveis, permitindo que a área avançasse da promessa à prática.^{1,13}

A tomografia por emissão de pósitrons (PET) tornou-se uma modalidade central para a avaliação quantitativa do fluxo sanguíneo miocárdico, da disfunção microvascular e dos mecanismos fisiopatológicos que envolvem as cardiomiopatias.^{1,7,10,12-14} Os avanços em radiofármacos, na tecnologia dos equipamentos e nos métodos de análise permitiram que a PET evoluísse da prova de conceito para a aplicação clínica estruturada, reforçando seu papel na imagem cardiovascular contemporânea.^{1,2,13}

Neste contexto, 2025 representou um ano de transição decisivo para a cardiologia nuclear, definido por amadurecimento, integração e crescente relevância clínica. Este editorial aborda áreas-chave com evidências consolidadas, destaca aplicações emergentes que ganharam impulso e delinea direções atuais e futuras, com a PET posicionada no centro da imagem cardiovascular de precisão.

Da Detecção de Isquemia ao Fenótipo Fisiológico: Consolidação em 2025

Um dos desenvolvimentos mais marcantes na cardiologia nuclear nos últimos anos foi a transição da detecção de isquemia para o fenótipo fisiológico, mudança que remodelou

Palavras-chave

Tomografia por Emissão de Pósitrons; Inflamação; Medicina de Precisão.

Correspondência: Simone Cristina Soares Brandão •

20 Chapel St., Apt. B411. CEP: 02446.

Brookline, MA - EUA

Email: ssoaresbrandao@bwh.harvard.edu

DOI: <https://doi.org/10.36660/abcimg.20260007>

a prática clínica.^{1,14} Central a essa evolução é o reconhecimento da disfunção microvascular coronariana (DMC) como um fenótipo clinicamente relevante, e não como um achado incidental ou secundário.¹⁵ A DMC tem sido cada vez mais compreendida como um substrato biológico fundamental subjacente a sintomas persistentes, doença cardiometabólica, aterosclerose coronariana difusa e insuficiência cardíaca, mesmo na ausência de doença epicárdica obstrutiva.^{1,7,10,13}

Nesse contexto, a PET emergiu como padrão de referência para a avaliação quantitativa do fluxo sanguíneo miocárdico e da reserva de fluxo miocárdico.¹³ A capacidade de quantificar a fisiologia coronariana em todo o miocárdio de forma não invasiva remodelou a avaliação clínica, permitindo diagnóstico mais preciso, decisões terapêuticas mais fundamentadas e melhor estratificação de risco em pacientes com padrões de doença complexos ou difusos. Em 2025, essas métricas quantitativas derivadas da PET ultrapassaram o âmbito da pesquisa e foram incorporadas progressivamente aos fluxos clínicos de rotina em centros especializados.¹

O amadurecimento clínico do flurpiridaz exemplifica essa mudança de paradigma.^{3,14,16,17} Antes considerado um radiofármaco investigacional promissor, o flurpiridaz entrou em fase de implementação clínica por suas características favoráveis de imagem, vantagens logísticas e desempenho fisiológico robusto.^{14,16} Seu potencial para expandir o acesso à imagem de perfusão miocárdica por PET, por meio de uma melhor qualidade de imagem, protocolos de estresse mais flexíveis e fluxos de trabalho mais otimizados, representa um passo crucial para a maior adoção da imagem fisiológica.^{3,16} Em conjunto, esses avanços evidenciam uma mudança fundamental na cardiologia nuclear.

Expansão Além da Doença Coronária Obstrutiva

Em 2025, a cardiologia nuclear continuou a expandir-se além do modelo tradicional de doença arterial coronária obstrutiva, refletindo uma compreensão mais ampla da doença cardiovascular como um sistema biológico complexo e dinâmico.^{4,6} A doença cardiovascular é reconhecida como resultado da interação de processos metabólicos, inflamatórios, neuro-hormonais e fibróticos que evoluem ao longo do tempo, com reconhecimento crescente da estreita interação entre o metabolismo miocárdico e a ativação imune como determinantes fundamentais da expressão da doença.¹⁸ Nenhuma métrica isolada é capaz de capturar plenamente essa complexidade, o que ajuda a explicar a ampla variabilidade de apresentação clínica, resposta terapêutica e de desfecho entre pacientes.

Nesse contexto, a imagem molecular assumiu papel estratégico. Seu valor reside não apenas na detecção da doença,

mas na visualização e quantificação *in vivo* de processos biológicos subjacentes, muitos dos quais representam alvos terapêuticos potencialmente modificáveis. Ao investigar inflamação, ativação de fibroblastos, disfunção autonômica e fisiologia microvascular, a cardiologia nuclear oferece uma janela para mecanismos de doença que vão além da anatomia luminal,^{5,6} incluindo ativação imune induzida por estresse metabólico.¹⁹

Diversos domínios clínicos ilustram essa expansão. Na insuficiência cardíaca, a imagem por PET permite uma fenotipagem mais refinada por meio da avaliação da DMC, fornecendo informações sobre remodelamento miocárdico e declínio funcional. Nas doenças de condução, especialmente no bloqueio de ramo esquerdo, a imagem nuclear ultrapassou descrições puramente morfológicas e passou a caracterizar dissincronia mecânica, padrões regionais de perfusão e associações com remodelamento adverso.⁸ Na cardio-oncologia, a PET cardíaca com FDG emergiu como ferramenta robusta para investigar respostas metabólicas e inflamatórias miocárdicas iniciais à terapia oncológica,^{9,20} capturando uma vulnerabilidade biológica que pode preceder e não refletir-se consistentemente na deterioração funcional precoce.²¹ Essas alterações metabólicas não se correlacionam de forma consistente com reduções precoces na fração de ejeção do ventrículo esquerdo ou na deformação longitudinal global, indicando que a PET-FDG capta um sinal distinto e biologicamente significativo, em vez de servir apenas como um marcador substituto para comprometimento funcional.⁹

Coletivamente, essas aplicações refletem uma mudança conceitual mais ampla. A cardiologia nuclear está em transição de uma imagem predominantemente diagnóstica e prognóstica para um instrumento orientador de terapias baseadas em mecanismos. A imagem obtida é cada vez mais utilizada para guiar a seleção de pacientes, definir o momento ideal para intervenção e monitorar a resposta biológica ao tratamento.^{6,22} Nesse paradigma em evolução, o verdadeiro valor da cardiologia nuclear reside em sua capacidade de quantificar processos biológicos passíveis de intervenção em benefício do paciente.²

Tecnologia e Radiofármacos: da Inovação à Implementação Clínica

Em 2025, os avanços tecnológicos e em radiofármacos na cardiologia nuclear foram definidos menos pela novidade e mais pela prontidão clínica.^{2,7,14,16,22,23} Melhorias na reprodutibilidade de métricas quantitativas, fluxos de trabalho mais curtos e maior integração entre plataformas de hardware e software marcaram a transição da prova de conceito para a implementação clínica estruturada. Em conjunto, esses desenvolvimentos fortaleceram a confiança na PET quantitativa e facilitaram uma maior adoção na prática clínica de rotina.^{5,16}

A amiloidose cardíaca exemplifica esse amadurecimento. Embora os radiofármacos SPECT com afinidade óssea permaneçam fundamentais para o diagnóstico, avanços recentes superaram as abordagens tradicionais.² Radiofármacos PET, como o 124I-*evuzamitide* (AT-01), e

agentes SPECT emergentes, incluindo o 99mTc-p5+14, destacam o potencial para caracterização tecidual mais específica.^{22,23} Essas ferramentas podem aprimorar a diferenciação entre amiloidose por cadeia leve e por transtirretina, favorecer a detecção mais precoce da doença e melhorar a integração entre diagnóstico, prognóstico e decisão terapêutica.

A avaliação fisiológica também avançou por meio do refinamento da quantificação de fluxo.^{12,17} A PET permanece como padrão de referência para a avaliação quantitativa do fluxo sanguíneo miocárdico,¹³ permitindo análise da perfusão transmural e subendocárdica e revelando vulnerabilidades regionais não capturadas por métricas globais isoladas.¹² Estudos de validação paralelos com câmeras SPECT de telureto de cádmio-zinco demonstraram forte correlação com a PET, indicando um futuro em que a fisiologia de precisão poderá tornar-se acessível a centros além dos altamente especializados.²⁴

Por fim, a inteligência artificial e grandes bases de dados estão remodelando a interpretação de imagens e a avaliação de risco.²⁵ A quantificação automatizada, a integração com biobancos e valores de referência específicos para sexo e idade estão aprimorando a robustez e reprodutibilidade.⁷ Registros como o REFINE PET, atualmente com mais de 35.000 pacientes, ilustram como abordagens orientadas por dados conectam imagem, fisiologia e cuidado cardiovascular personalizado.^{4,25}

Cardiologia Nuclear em 2026: A Era da Integração

A cardiologia nuclear entrou numa nova fase. O ano de 2025 representou mais do que progresso incremental; marcou a consolidação de um campo que agora desempenha papel decisivo na compreensão da fisiologia cardiovascular, no refinamento diagnóstico e na condução do manejo clínico. A PET quantitativa, sustentada por radiofármacos validados, hardware avançado e evidências clínicas robustas, tornou-se central nessa transformação.¹ Simultaneamente, avanços contínuos em metodologias quantitativas e o desenvolvimento de radiofármacos PET e SPECT cada vez mais sensíveis e específicos ampliam os conhecimentos biológicos e clínicos acessíveis pela cardiologia nuclear.^{3,22,23}

À medida que avançamos em 2026, espera-se que o foco se desloque da consolidação para a integração. A imagem orientada por fenótipo e prognóstico,⁸ apoiada por inteligência artificial, grandes bases de dados²⁵ e métricas quantitativas padronizadas,⁷ deverá informar cada vez mais a tomada de decisão clínica. Nesse cenário em evolução, a cardiologia nuclear deixa de ser vista apenas como modalidade diagnóstica complementar e passa a ser um componente central da medicina cardiovascular de precisão, transformando sinais biológicos complexos em conhecimento clinicamente aplicável.⁶ Nesse sentido, a área continua a refletir a visão de Marie Curie: avançar do que é temido para o que é compreendido. Se 2025 marcou a consolidação, 2026 marca a integração e o impacto (Figura 1).

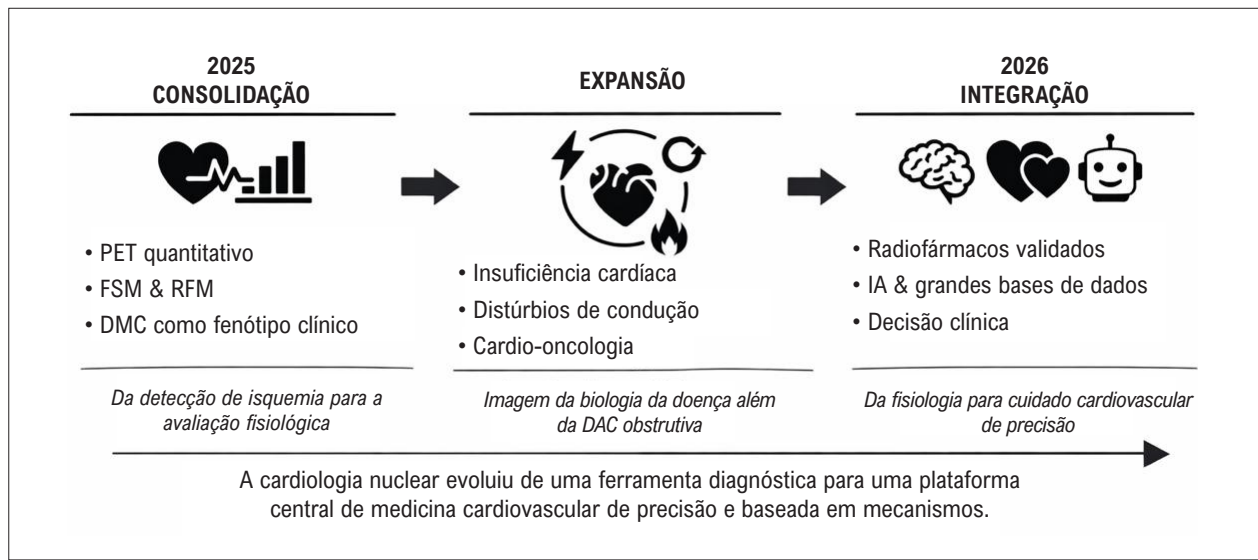


Figura 1 – Evolução da cardiologia nuclear da consolidação à integração (2025–2026). Em 2025 (Consolidação), a tomografia por emissão de pósitrons (PET) quantitativa, com avaliação rotineira do fluxo sanguíneo miocárdico (FSM) e da reserva de fluxo miocárdico (RFM), consolidou a transição da detecção de isquemia para a avaliação fisiológica, estabelecendo a disfunção microvascular coronária (DMC) como fenótipo clínico. A fase de Expansão reflete a ampliação da cardiologia nuclear além da doença arterial coronária (DAC) obstrutiva para a imagem da biologia da doença na insuficiência cardíaca, nos distúrbios de condução, particularmente no bloqueio de ramo esquerdo (BRE), e na cardio-oncologia. Em 2026 (Integração), radiofármacos validados, análise de grandes bases de dados orientada por inteligência artificial (IA) e tomada de decisão clínica guiada por imagem convergem para viabilizar o cuidado cardiovascular de precisão.

Referências

1. Bateman TM, Al-Mallah MH, Alnabelsi TS, Arumugam P, Calnon DA, Chareonthaitawee P, et al. Clinical Indications for Positron Emission Tomography Myocardial Perfusion Imaging and Myocardial Blood Flow Quantification: An American Society of Nuclear Cardiology Position Statement. *J Nucl Cardiol*. 2025;102619. doi: 10.1016/j.nuclcard.2025.102619.
2. Aimo A, Chen YFF, Castiglione V, Passino C, Genovesi D, Giorgetti A, et al. Positron Emission Tomography in Cardiac Amyloidosis: Current Evidence and Future Directions. *Heart Fail Rev*. 2025;30(3):605-18. doi: 10.1007/s10741-025-10493-3.
3. Brandão SCS. A New Horizon in Nuclear Cardiology in Brazil: Impact and Barriers of F-18 Flurpiridaz. *Arq Bras Cardiol: Imagem Cardiovasc*. 2024;37(4):e20240118. doi: 10.36660/abcimg.20240118i.
4. Chareonthaitawee P. Our Adventure: A Year of Innovation, Collaboration, and Global Growth. *J Nucl Cardiol*. 2025;54:102569. doi:10.1016/j.nuclcard.2025.102569.
5. Di Carli MF. Another Year We Built Together. *J Nucl Cardiol*. 2025;54:102590. doi: 10.1016/j.nuclcard.2025.102590.
6. Thackeray JT. Theranostics in Nuclear Cardiology: Approaching Harbour or Boundless Horizon? *J Nucl Cardiol*. 2025;54:102481. doi: 10.1016/j.nuclcard.2025.102481.
7. Joseph L, Trinquart L, Lopez DM, Brandao S, Brown JM, Divakaran S, et al. Age- and Sex-Adjusted Myocardial Flow Reserve Percentiles for Personalized Cardiovascular Risk Assessment. medRxiv. 2025;2025.12.30.25343223. doi: 10.64898/2025.12.30.25343223.
8. Brandão SCS, Joseph L, Brown JM, Lopez D, Lemley M, Ramirez G, et al. Mechanical Dyssynchrony and Perfusion Heterogeneity Predict Adverse LV Remodeling in Patients with and without LBBB. medRxiv. 2026;2026.01.09.26343726. doi: 10.64898/2026.01.09.26343726.
9. Becker MMC, Buril RO, Wanderley MRB Jr, Berenguer DRF, Mourato FA, Costa IBSS, et al. Prospective Multicenter Evaluation of 18F-FDG PET/CT and Strain for Early Cardiotoxicity Detection in Lymphoma Patients. *Cardiooncology*. 2025;12(1):1. doi: 10.1186/s40959-025-00416-4.
10. Souza ACDAH, Troschel AS, Marquardt JP, Hadžić I, Foldyna B, Moura FA, et al. Skeletal Muscle Adiposity, Coronary Microvascular Dysfunction, and Adverse Cardiovascular Outcomes. *Eur Heart J*. 2025;46(12):1112-23. doi: 10.1093/eurheartj/ehae827.
11. Liang S, Hou P, Wang X, Liang W, Zhong S, Zhao R, et al. Comparison of 18F-FAPI-42 PET for Detecting Cardiac Fibroblast Activation in Dilated Cardiomyopathy with Histopathology and CMR. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2025;18(9):997-1009. doi: 10.1016/j.jcmg.2025.05.021.
12. Xu X, Divakaran S, Weber BN, Hainer J, Laychak SS, Auer B, et al. Relationship of Subendocardial Perfusion to Myocardial Injury, Cardiac Structure, and Clinical Outcomes among Patients with Hypertension. *Circulation*. 2024;150(14):1075-86. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.123.067083.
13. Vrints C, Andreotti F, Koskinas KC, Rossello X, Adamo M, Ainslie J, et al. 2024 ESC Guidelines for the Management of Chronic Coronary Syndromes. *Eur Heart J*. 2024;45(36):3415-537. doi: 10.1093/eurheartj/ehae177.
14. Lopez DM, Huck DM, Divakaran S, Brown JM, Weber BN, Lemley M, et al. Utility of 18F-Flurpiridaz PET Relative Flow Reserve in Differentiating Obstructive from Nonobstructive Coronary Artery Disease. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2025;18(11):e018323. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.125.018323.
15. Oliveira GMM, Almeida MCC, Valério CM, Giuffrida F, Espíndola L Neto, Izar MCO, et al. Position Statement on Cardiometabolic Health Across the Woman's Life Course - 2025. *Arq Bras Cardiol*. 2025;122(9):e20250615. doi: 10.36660/abc.20250615.
16. Rupa S, deKemp R, Horgan S, Al-Mallah MH, Bateman T, Case J, et al. Laboratory Considerations on the Use of F-18 Myocardial Perfusion Imaging Radiotracers: An ASNC Information Statement. *J Nucl Cardiol*. 2025;48:102230. doi: 10.1016/j.nuclcard.2025.102230.

17. Builoff V, Lemley M, Miller RJH, Fujito H, Ramirez G, Kavanagh P, et al. Subendocardial Quantification Enhances Coronary Artery Disease Detection in 18F-Flurpiridaz PET. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2025;52(9):3342-52. doi: 10.1007/s00259-025-07174-6.
18. Fragasso G, Stolfo D, Anker MS, Bayes-Genis A, Chioncel O, Heymans S, et al. The Crosstalk between Immune Activation and Metabolism in Heart Failure. A Scientific Statement of the Heart Failure Association of the ESC. *Eur J Heart Fail*. 2025;27(9):1700-19. doi: 10.1002/ejhf.3703.
19. Pereira A, Alvarez-Argote S, Meite I, Inui H, Sterling JK, Thorp EJ, et al. Metabolic Stress and Immune Activation in Heart Failure with a Preserved Ejection Fraction. *Immunol Rev*. 2026;337(1):e70103. doi: 10.1111/imr.70103.
20. Berenguer DRF, Arruda GFA, Becker MMC, Dourado MLC, Buril RO, Mourato FA, et al. Monitoring Myocardial Metabolic Changes in Lymphoma Patients Undergoing Chemotherapy Using FDG PET/CT. *ABC Imagem Cardiovasc*. 2025;38(4):e20250067. doi: 10.36660/abcimg.20250067i.
21. Galán-Arriola C, Pérez-Camargo D, Jorge I, Bautista V, Ayaon-Albarrán A, Pérez-Martínez C, et al. Anthracycline Cardiotoxicity: Role of Metabolic Vulnerability Induced by Cardiac Pressure Overload. *Eur Heart J*. 2026;ehaf1060. doi: 10.1093/eurheartj/ehaf1060.
22. Smiley DA, Einstein AJ, O’Gorman KJ, Santana D, Teruya S, Chan N, et al. Early Detection of Transthyretin Cardiac Amyloidosis Using 124I-Evuzamitide Positron Emission Tomography/Computed Tomography. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2025;18(7):799-811. doi: 10.1016/j.jcmg.2025.01.018.
23. Martin E, Kassira A, Stuckey A, Whittle B, Guthrie S, Kennel SJ, et al. A Tale of Two Tracers - Amyloid Imaging with Investigational Radiotracers Iodine (124I) Evuzamitide and 99mTc-p5+14 (AT-05). *J Nucl Cardiol*. 2025;102451. doi: 10.1016/j.nuclcard.2025.102451.
24. Yahiro DS, Leite LF, Azevedo GL, Al-Mallah MH, Mesquita CT. Comparison of PET-CT and CZT-SPECT on Myocardial Blood Flow and Flow Reserve Measurement: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Nucl Cardiol*. 2025;52:102279. doi: 10.1016/j.nuclcard.2025.102279.
25. Ramirez G, Lemley M, Shanbhag A, Kwiecinski J, Miller RJH, Kavanagh PB, et al. The REgistry of Flow and Perfusion Imaging for Artificial Intelligence with Positron Emission Tomography (REFINE PET): Rationale and Design. *J Nucl Cardiol*. 2025;52:102449. doi: 10.1016/j.nuclcard.2025.102449.

