

# Tomografia Computadorizada com Contagem de Fótons na Imagem Cardiovascular: Onde Estamos e o que Está por Vir

*Photon-Counting Computed Tomography in Cardiovascular Imaging: Where We Are and What Lies Ahead*

Paulo Savoia,<sup>1</sup> Rodrigo Bello<sup>1</sup>

University of Iowa Hospitals and Clinics, <sup>1</sup> Iowa City, Iowa – EUA

A Angiotomografia Computadorizada (ATC) tem sido um recurso importante no diagnóstico cardiovascular há décadas. A melhoria contínua na aquisição rápida de dados, frequentemente com resolução espacial mais alta, consolidou o método como indispensável para o diagnóstico e manejo de diversas condições cardiovasculares, como aneurismas, dissecação aórtica e tromboembolismo pulmonar.<sup>1,2</sup> O uso da ATC na imagem cardíaca e coronariana também conquistou território e relevância importantes.<sup>3,4</sup> As técnicas de Tomografia Computadorizada (TC) vêm avançando significativamente desde sua introdução na medicina. Desde os detectores únicos, passando pelos tomógrafos helicoidais, tomógrafos multidetectores com pitch elevado, melhorias nos algoritmos de reconstrução, surgimento da tecnologia de dupla energia e, mais recentemente, a capacidade de adquirir imagens de todo o coração em apenas um batimento cardíaco com informação de todo o ciclo cardíaco, são marcos impressionantes. A Reserva de Fluxo Fracionado por TC (do inglês, FFR-CT) também é uma técnica muito promissora.<sup>5</sup> O progresso, no entanto, apresenta certas desvantagens: a radiação ionizante continua sendo uma preocupação e, apesar das estratégias de redução como a modulação de dose, alguns exames cardiovasculares de ATC ainda apresentam níveis relativamente altos de radiação absorvida, especialmente aqueles com múltiplas séries, cortes extremamente finos e reconstruções retrospectivas de porções maiores do ciclo cardíaco. Seguindo essa tendência de melhorar a qualidade da imagem com a menor radiação ionizante possível, surgiu uma nova técnica complexa: a TC com Contagem de Fótons (PCCT, da sigla em inglês).

A maior distinção entre a TC convencional e a PCCT está nos detectores de raios X. O detector da TC convencional é baseado na recepção dos fótons de raios X que interagiram com o paciente, convertendo-os em fótons de luz (sistema indireto) e, em seguida, convertendo essa luz em sinais elétricos que, por fim, são

transformados em sinais digitais. Esse sistema é chamado de Detector Integrador de Energia (EID, da sigla em inglês). Basicamente, quanto mais luz houver, mais raios X chegarão, além de menor interação/menor penetração nos tecidos do paciente. Não é possível diferenciar exatamente quantos raios X estão chegando nem os diferentes níveis de energia de cada fóton. Além disso, os septos entre cada um dos detectores também limitam a recepção de raios X.<sup>6,7</sup> Por outro lado, os detectores da PCCT conseguem detectar separadamente cada fóton de raio X que chega e medir diretamente a energia de cada um desses fótons. Isso ocorre porque o detector da PCCT conta com uma camada de cristal de alta tensão, que realoca elétrons para cada fóton recebido, e o número de elétrons realocados é proporcional à energia de cada raio X. Os elétrons realocados geram um pulso elétrico que será finalmente convertido em sinal digital. Até mesmo fótons de menor energia podem ser detectados, melhorando a relação contraste-ruído da imagem. Trata-se de um sistema direto, em que não há septos entre os detectores. Ou seja, menos raios X são necessários (portanto, menor radiação) e é possível separar os raios X de acordo com sua energia, permitindo aplicações de reconhecimento tecidual (diferentes energias conhecidas tendem a interagir com diferentes tecidos conhecidos), funcionando como uma TC de dupla energia.<sup>8,9</sup>

À medida que essa nova tecnologia se tornou disponível, a comunidade científica ficava cada vez mais interessada nos avanços da tecnologia, e publicações interessantes foram sendo lançadas. Em meados de 2022, Esquivel et al.<sup>6</sup> publicaram conceitos relevantes sobre a PCCT para radiologistas: “Key Points Radiologists Should Know”, que ajudou a disseminar a informação e o conhecimento entre a comunidade radiológica internacional. A possibilidade de melhorar a caracterização de pequenos vasos (por exemplo, artérias coronárias distais, artérias periféricas, artéria de Adamkiewicz e pequenos retalhos arteriais) foi o destaque. Ainda em 2022, Si-Mohamed et al.<sup>10</sup> publicaram os primeiros resultados em humanos da angiotomografia coronariana com PCCT: apesar de ser um grupo pequeno de quatorze participantes, este estudo prospectivo demonstrou melhorias significativas na qualidade geral da imagem, qualidade diagnóstica e confiança diagnóstica da PCCT em comparação com uma TC de dupla camada EID, analisando múltiplas variáveis como lúmen coronariano distal, nitidez de calcificações e stents – cenários clássicos de avaliação parcialmente limitada com a tecnologia de TC disponível antes da PCCT.

## Palavras-chave

Angiografia por Tomografia Computadorizada; Técnicas de Diagnóstico Cardiovascular; Cardiologia; Radiologia.

**Correspondência:** Paulo Savoia MD PhD •

University of Iowa Hospitals and Clinics. Hawkins Dr., 200. sala 3884 JPP  
CEP: 52242. Iowa City, Iowa – EUA  
E-mail: paulo-savoia@uiowa.edu

**DOI:** <https://doi.org/10.36660/abcimg.20250035>

Em 2023, Cademartiri et al publicaram um artigo completo sobre as aplicações cardíacas e coronarianas da PCCT.<sup>11</sup> Os autores revisaram a física da PCCT, analisaram publicações relevantes até o momento e argumentaram que ela seria supostamente benéfica na avaliação do lúmen coronariano, stents, válvulas protéticas, composição de placas, imagem do tecido miocárdico, bem como na redução da dose de radiação, redução do meio de contraste e melhoria na relação contraste-ruído. A redução no uso de contraste pode chegar a cerca de 50%. Quanto à redução de dose de radiação, estima-se entre 19–32% segundo alguns autores.<sup>12,13</sup>

Após todas essas melhorias interessantes publicadas em pequenos grupos de pacientes e ensaios pictóricos, finalmente chegava a hora de testar o método na prática clínica. A teoria e os casos demonstrados até agora são muito promissores. Resumimos as principais melhorias de qualidade da PCCT na Tabela 1. O próximo passo provavelmente será a publicação de dados com amostras maiores de pacientes, mais centros e, principalmente, determinar se há mudanças significativas nos desfechos dos pacientes. A experiência em nossa instituição, onde temos a oportunidade de trabalhar com três equipamentos de PCCT (um 100% dedicado à pesquisa e dois para avaliação clínica), também caminha nessa direção, buscando medir diferenças na dose de radiação, uso de meio de contraste e mudanças significativas no manejo dos pacientes. Começamos a utilizar o PCCT no

início de 2022. Por outro lado, obviamente existem muitos desafios relacionados ao uso da PCCT em escala global, como pouca experiência clínica com o novo método, necessidade de otimização dos protocolos para extrair o máximo possível da técnica (uma vez que temos múltiplos novos protocolos e kernels disponíveis, com inúmeros parâmetros de reconstrução), visualizadores de imagem robustos e atualizados para lidar com a enorme quantidade de imagens geradas em um único exame (a espessura de corte pode chegar a 0,2 mm, gerando 11.000 imagens em uma única ATC cardíaca) e, naturalmente, o investimento financeiro necessário nesses novos equipamentos. A Figura 1 mostra um exemplo de aquisição de imagem cardíaca por PCCT de um de nossos pacientes com prótese valvar: observe a presença mínima ou quase inexistente de artefatos de endurecimento do feixe ou blooming. A Figura 2 mostra a artéria coronária descendente anterior esquerda de outro paciente examinado em nossa instituição com PCCT, comparada com uma aquisição anterior da mesma artéria em uma TC “convencional” multidetector.

Por fim, podemos afirmar que não há dúvidas de que a nova tecnologia PCCT trouxe avanços significativos na qualidade da imagem, com imagens de ultra-alta resolução, melhoria importante na relação sinal-ruído e redução geral nas doses de radiação, potencialmente aumentando a precisão dos médicos responsáveis e maximizando o cuidado centrado no paciente. A PCCT provavelmente será o futuro dos nossos tomógrafos.

### **Tabela 1 – Principais Melhorias de Qualidade da PCCT**

#### **1. Resolução Espacial Superior**

Elementos detectores menores permitem imagens mais nítidas com maior detalhamento anatômico, beneficiando aplicações como visualização de artérias coronárias, mas também imagens de pulmão e ouvido interno, por exemplo.

#### **2. Maior Contraste Tecidual e Diferenciação de Materiais**

A detecção multi-energética permite decomposição de materiais (por exemplo, cálcio, iodo, ácido úrico), melhorando a caracterização de lesões e reduzindo a ambiguidade diagnóstica.

#### **3. Menor Dose de Radiação**

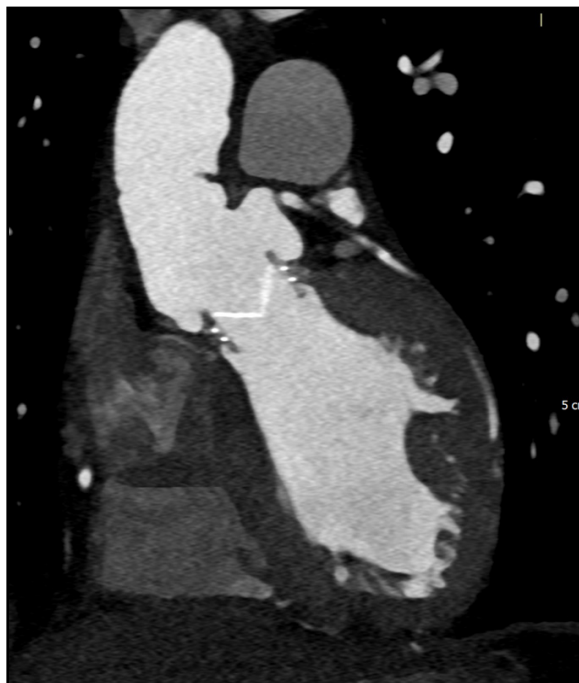
Devido à maior eficiência dos detectores e menor ruído, imagens com qualidade diagnóstica frequentemente podem ser obtidas com exposição significativamente menor à radiação.

#### **4. Redução de Artefatos**

A PCCT minimiza artefatos de endurecimento do feixe e artefatos metálicos, melhorando a fidelidade da imagem em casos difíceis como válvulas protéticas, implantes e regiões próximas a ossos.

#### **5. Imagem Espectral Nativa sem Penalidade de Dose**

Ao contrário da TC de dupla energia, a PCCT fornece dados espectrais em cada exame, sem a necessidade de protocolos especializados ou aumento da dose.



**Figura 1** – Aquisição por PCCT do coração de um de nossos pacientes com válvula protética: observe a presença mínima ou quase inexistente de artefatos de endurecimento do feixe ou blooming.



**Figura 2** – Artéria coronária descendente anterior esquerda de outro paciente com PCCT examinado em nossa instituição (Figura 2B), comparada com uma aquisição da mesma artéria alguns meses antes com uma TC “convencional” de dupla fonte (2x192 fileiras de detectores) (Figura 2A). A aquisição “convencional” mostra mais artefatos de endurecimento do feixe adjacentes a uma placa calcificada (área hipoatenuante – seta branca) em comparação com a aquisição por PCCT – seta preta (Figura 2B). Além disso, há também menor incidência de artefatos de blooming da placa calcificada na aquisição por PCCT (Figura 2B) – asterisco preto – em comparação com a aquisição “convencional” (Figura 2A) – asterisco branco. O artefato de blooming é uma causa conhecida de superestimação da estenose luminal em placas calcificadas, e de fato a placa parece maior na aquisição “convencional”.

## Referências

1. Sun Z, Al Moudi M, Cao Y. CT Angiography in the Diagnosis of Cardiovascular Disease: A Transformation in Cardiovascular CT Practice. *Quant Imaging Med Surg*. 2014;4(5):376-96. doi: 10.3978/j.issn.2223-4292.2014.10.02.
2. Zantonelli G, Cozzi D, Bindi A, Cavigli E, Moroni C, Luvarà S, et al. Acute Pulmonary Embolism: Prognostic Role of Computed Tomography Pulmonary Angiography (CTPA). *Tomography*. 2022;8(1):529-39. doi: 10.3390/tomography8010042.
3. Sun Z, Choo GH, Ng KH. Coronary CT Angiography: Current Status and Continuing Challenges. *Br J Radiol*. 2012;85(1013):495-510. doi: 10.1259/bjr/15296170.
4. Cademartiri F, Casolo G, Clemente A, Seitun S, Mantini C, Bossone E, et al. Coronary CT Angiography: A Guide to Examination, Interpretation, and Clinical Indications. *Expert Rev Cardiovasc Ther*. 2021;19(5):413-25. doi: 10.1080/14779072.2021.1915132.
5. Chen J, Wetzel LH, Pope KL, Meek LJ, Rosamond T, Walker CM. FFRCT: Current Status. *AJR Am J Roentgenol*. 2021;216(3):640-8. doi: 10.2214/AJR.20.23332.
6. Esquivel A, Ferrero A, Mileto A, Baffour F, Horst K, Rajiah PS, et al. Photon-Counting Detector CT: Key Points Radiologists Should Know. *Korean J Radiol*. 2022;23(9):854-65. doi: 10.3348/kjr.2022.0377.
7. Remy-Jardin M, Hutt A, Flohr T, Faivre JB, Felloni P, Khung S, et al. Ultra-High-Resolution Photon-Counting CT Imaging of the Chest: A New Era for Morphology and Function. *Invest Radiol*. 2023;58(7):482-7. doi: 10.1097/RLI.0000000000000968.
8. Willemink MJ, Persson M, Pourmorteza A, Pelc NJ, Fleischmann D. Photon-Counting CT: Technical Principles and Clinical Prospects. *Radiology*. 2018;289(2):293-312. doi: 10.1148/radiol.2018172656.
9. Sartoretti T, Wildberger JE, Flohr T, Alkadhi H. Photon-Counting Detector CT: Early Clinical Experience Review. *Br J Radiol*. 2023;96(1147):20220544. doi: 10.1259/bjr.20220544.
10. Si-Mohamed SA, Boccacini S, Lacombe H, Diaw A, Varasteh M, Rodesch PA, et al. Coronary CT Angiography with Photon-Counting CT: First-In-Human Results. *Radiology*. 2022;303(2):303-13. doi: 10.1148/radiol.211780.
11. Cademartiri F, Meloni A, Pistoia L, Degiorgi G, Clemente A, Gori C, et al. Dual-Source Photon-Counting Computed Tomography-Part I: Clinical Overview of Cardiac CT and Coronary CT Angiography Applications. *J Clin Med*. 2023;12(11):3627. doi: 10.3390/jcm12113627.
12. Flohr T, Schmidt B, Ulzheimer S, Alkadhi H. Cardiac Imaging with Photon Counting CT. *Br J Radiol*. 2023;96(1152):20230407. doi: 10.1259/bjr.20230407.
13. Dobrolinska MM, van der Werf NR, van der Bie J, de Groen J, Dijkshoorn M, Booijs R, et al. Radiation Dose Optimization for Photon-Counting CT Coronary Artery Calcium Scoring for Different Patient Sizes: A Dynamic Phantom Study. *Eur Radiol*. 2023;33(7):4668-75. doi: 10.1007/s00330-023-09434-1.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da licença de atribuição pelo Creative Commons