ReGeo ISSN: 2177-3246

TECNOLOGIAS INOVADORAS E CÓDIGOS ABERTOS: PLATAFORMAS QUE POSSIBILITAM AOS PAÍSES EMERGENTES REDUZIR O HIATO DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND OPEN SOURCE: PLATFORMS ENABLING EMERGING COUNTRIES TO BRIDGE THE SCIENTIFIC RESEARCH GAP

TECNOLOGÍAS INNOVADORAS Y SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO: PLATAFORMAS QUE PERMITEN A LOS PAÍSES EMERGENTES SUPERAR LA BRECHA EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

https://doi.org/10.56238/revgeov17n9-181

Data de submissão: 28/08/2026 **Data de publicação:** 28/09/2026

Max dos Santos Ramos
Doutorando em Radioproteção e Dosimetria
Instituição: Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), LNMRI
E-mail: msxramos@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0007-0601-0292

Ronaldo Lins da Silva
Doutor
Instituição: Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD)
E-mail: ronaldo@ird.gov.br
Orcid: https://orcid.org/0009-0009-4636-6570

José Ubiratan Delgado
Doutor
Instituição: Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD)
E-mail: jose.delgado@ird.gov.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1198-7886

RESUMO

As pesquisas e os estudos neste trabalho relacionam as recentes inovações tecnológicas e o ecossistema colaborativo de seus usuários, às possibilidades e alternativas otimizadas dos procedimentos considerados pouco acessíveis ou exclusivos, como o estudo de fontes de radiação. No Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), utilizou-se um sistema espectrométrico composto por um detector cintilador e componentes de hardware e software importados, para adaptar novas tecnologias em placas embarcadas às saídas de sinais analógicos, que analisam fontes de radionuclídeos previamente calibradas e produzem documentos espectrométricos a serem tratados, ajustados e deconvoluídos em linguagens de código aberto recentes. Com o objetivo de reduzir custos, volumes de equipamentos e o processamento de dados, este trabalho adapta hardware dedicado e software open source a um sistema tradicional. Este procedimento é um exemplo que mostra a possibilidade de minimizar as diferenças tecnológicas existentes nas últimas décadas em países considerados emergentes.

Palavras-chave: Inovação. Ecossistema Colaborativo. Espectrometria Gama.

ABSTRACT
The research and studies presented here link recent technological innovations—and the collaborative ecosystem of their users—to new possibilities and alternatives for procedures previously considered inaccessible or exclusive, such as studying radiation sources. At the National Laboratory for Ionizing Radiation Metrology (LNMRI), a spectrometric system comprising a scintillation detector and imported hardware and software components was used to adapt new technologies—based on embedded boards—to analog signal outputs; this setup analyzes previously calibrated radionuclide sources and generates spectrometric data for processing, adjustment, and deconvolution using modern open-source languages. To reduce costs, equipment bulk, and data processing requirements, this work adapts dedicated hardware and open-source software to a traditional system. This procedure is an example demonstrating the possibility of minimizing technological disparities that have existed in emerging countries over recent decades.

Keywords: Innovation. Collaborative Ecosystem. Gamma Spectrometry.

RESUMEN
La investigación y los estudios presentados en este trabajo relacionan las recientes innovaciones tecnológicas y el ecosistema colaborativo de sus usuarios con las posibilidades y alternativas optimizadas de procedimientos considerados inaccesibles o exclusivos, como el estudio de fuentes de radiación. En el Laboratorio Nacional de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LNMRI), se utilizó un sistema espectrométrico compuesto por un detector de centelleo y componentes de hardware y software importados para integrar nuevas tecnologías en placas, con salidas de señales analógicas, que analizan fuentes de radionúclidos previamente calibradas y generan documentos espectrométricos para su procesamiento, ajuste y deconvolución en lenguajes de código abierto recientes. Con el objetivo de reducir costos, el volumen de equipos y el procesamiento de datos, este trabajo adapta hardware especializado y software de código abierto a un sistema tradicional. Este procedimiento es un ejemplo que muestra la posibilidad de minimizar las diferencias tecnológicas que han existido en las últimas décadas en países considerados economías emergentes.

Palabras clave: Innovación. Ecosistema Colaborativo. Espectrometría Gamma.

1 INTRODUÇÃO

Durante a última parte da história moderna, as revoluções científicas tornaram-se elitizadas devido ao acesso à infraestrutura eletrônica, supercomputadores, instalações biomédicas, laboratórios e equipes de cientistas altamente especializados. Porém, nos últimos 20 anos, a convergência entre *softwares* de código aberto, a rede mundial de computadores e, principalmente, o *hardware* especializado de baixo custo mudou fundamentalmente a prática e as condições das pesquisas de ponta, exclusivas do Norte Global ou Primeiro Mundo (CRESSEY, 2017).

Apesar dessas novas tecnologias e ecossistemas colaborativos, algumas áreas do conhecimento ainda permanecem exclusivas de pequenos centros de pesquisa ou de grandes indústrias. As ciências da radiação, por exemplo, têm sido historicamente concentradas em universidades, laboratórios nacionais, instalações nucleares e organizações industriais especializadas. Essas práticas são elitizadas devido à complexidade científica, ao alto custo de seus componentes eletrônicos, ao conhecimento especializado, às barreiras regulatórias e à concentração de expertise em instituições de grande capital (REGONA; XIA; LI, 2022).

Isto cria um paradoxo importante, pois a maioria das aplicações não é nuclear, mas está ligada às áreas da saúde e da indústria, que beneficiariam a sociedade como um todo. Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo avaliar como as inovações e as novas tecnologias em softwares *open-source* e *hardwares* dedicados podem ser opções ao processo metrológico com tecnologia importada, conhecido como espectrometria gama. A pesquisa se justifica pela necessidade de otimizar e reduzir os custos associados aos procedimentos realizados, que em geral são licenciados e fechados.

Em resumo, a proposta deste trabalho é avaliar qualitativamente e quantitativamente os dados espectrométricos retirados de uma fonte radioativa em um sistema tradicional de aquisição, e compará-los com os adquiridos em tecnologias mais recentes, substituindo algumas de suas partes e observando a hipótese de evolução dessas tecnologias até atingir um equilíbrio técnico, que possibilite a democratização desses conhecimentos (REGONA; XIA; LI, 2022).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Num mundo acelerado e em constante adaptação entre sociedade e inovação, o surgimento e a integração de novas tecnologias impactam profundamente as estratégias organizacionais, acadêmicas, o cenário industrial, o desenvolvimento econômico e social em geral (BAHOO, 2023). Neste trabalho, explorou-se a adoção de tecnologias digitais emergentes específicas, como Sistemas Embarcados, Inteligência Artificial (IA), Indústria 4.0 (I4.0) e Internet das Coisas (IoT).

Reconhecendo a natureza interconectada das tecnologias emergentes, esta pesquisa enfatiza a importância da colaboração entre diversas partes interessadas, como instituições de ensino, organizações de pesquisa e agências governamentais. Esse esforço colaborativo forma um ecossistema único e interdependente, essencial para a aplicação, adaptação e aprimoramento eficazes das tecnologias digitais emergentes (CRESSEY, 2017).

Nas relações atuais entre os investimentos e as ciências aplicadas, os custos diretos ditam as direções da pesquisa, em que os equipamentos científicos são parte essencial do desenvolvimento das sociedades e as novas tecnologias possibilitam novas ideias, perspectivas e vice-versa (SYDENHAM, 2003).

Ao longo da história e em todas as disciplinas, a tecnologia dita o ritmo do conhecimento e da compreensão. O custo é o fator determinante na decisão sobre qual equipamento um laboratório deve adquirir, compartilhar ou simplesmente desejar, e, de certa forma, os custos relacionados afetam o ritmo das descobertas (CRESSEY, 2017). Como exemplo, a queda nos custos do sequenciamento genético gerou uma explosão de novas pesquisas. Quando os custos diminuem, observa-se uma relação direta com a produção científica, bem como com as aplicações industriais e comerciais (BRAY *et al*, 2012).

Atualmente não existe um banco de dados que compartilhe todas as áreas da ciência, porém essa ideia cresceu bastante em participação e capacidade técnica desde o relatório *Gathering of Open Science Hardware* (GOSH), que tem sido um ponto de convergência para essa comunidade global, promovendo eventos e discussões virtuais. O GOSH foi um resultado híbrido de dois outros movimentos: *hardware* aberto e ciência aberta (OPENHARDWARE.SCIENCE, 2026).

A estratégia de *hardware* e código aberto é disponibilizar projetos *online* para que outros possam reproduzi-los e fazer adaptações. Dificuldades e desafios na fabricação do mundo real impediram que o movimento alcançasse suas contrapartes digitais, mas existem casos de sucesso, como os microcontroladores embarcados Arduino e Raspberry Pi, que aceleraram o desenvolvimento de protótipos de sistemas em todo o mundo (D'AUSILIO, 2011).

Da perspectiva do GOSH, a ciência verdadeiramente aberta exige *hardware* aberto e replicação em cada etapa de um experimento. As ferramentas abertas significam menores custos porque foram feitas principalmente com componentes disponíveis no mercado e projetos fabricados digitalmente.

Os principais benefícios são:

- Inovação acelerada com testes colaborativos que desenvolvem e reduzem o tempo de compartilhamento com a rede conectada.

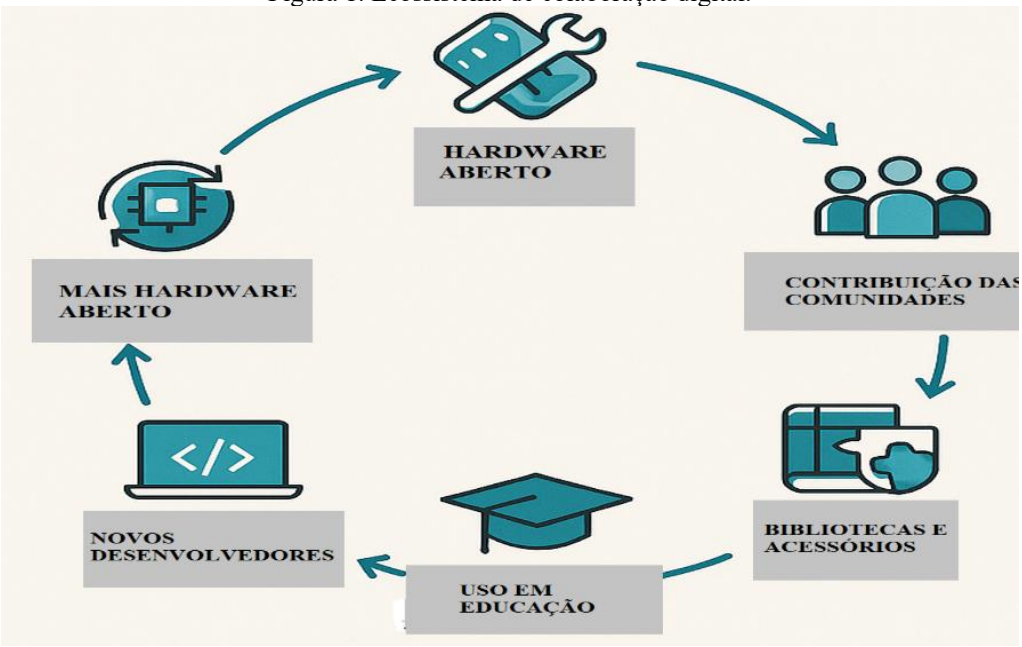
• Eficiência de custos que ocorre devido à desagregação das funções de hardware, levando à redução e otimização dos custos.

Plataformas de *hardware* aberto, como Arduino, STM32 e Raspberry Pi, ajudam a ensinar habilidades das ciências aplicadas em grandes grupos de pesquisa, como o *OpenHw Group*, que foca seus trabalhos em núcleos RISC-V de código aberto de alta qualidade e ferramentas relacionadas (ARDUINO, 2023).

Em resumo, a diferenciação inovadora entre estruturas socioeconômicas impulsionou diversos fenômenos interligados, incluindo a oferta de serviços personalizados e otimizados em diversos setores.

Para equilibrar as expectativas críticas da oferta e da procura, especialmente nas regiões em desenvolvimento, a adoção de um modelo de ecossistema de inovação tornou-se altamente relevante. Compartilhar e colaborar com experiências e conhecimentos promovem projetos de inovação e proporcionam acesso a uma base de conhecimento mais ampla no ecossistema de inovação, Figura 1.

Figura 1. Ecossistema de colaboração digital.



Fonte: Disponível em: https://medium.com/@amitmcharantimath/what-arduino-built-changed-the-maker-ecosystem-forever-and-now-qualcomm-holds-the-next-move-2dbcf6b71747. Acesso em: 16 de Set.. 2025.

2.1 TÉCNICAS UTILIZADAS NAS AQUISIÇÕES DE DADOS DAS FONTES RADIOATIVAS

Um aspecto particularmente relevante atualmente é a possibilidade de desenvolver sistemas de análise espectrométrica de fótons gama mais acessíveis, compactos e automatizados. Detectores de

cintilação, eletrônica embarcada, microcomputadores e *software* de código aberto permitem desenvolver equipamentos que antes dependiam de sistemas comerciais de alto custo.

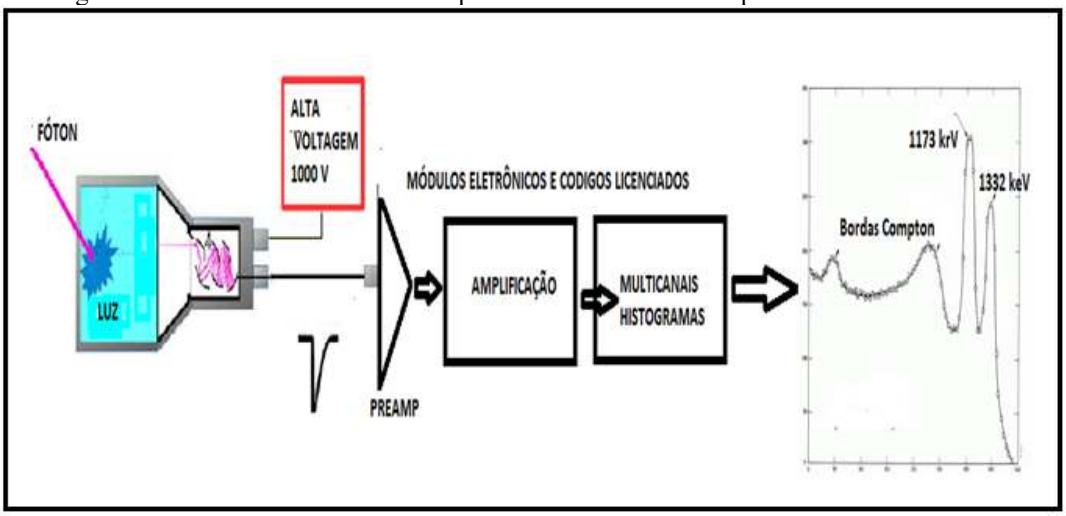
Isso cria uma oportunidade importante para universidades e centros de pesquisa, especialmente em países em desenvolvimento, pois a redução do custo da instrumentação pode ampliar o acesso à pesquisa nuclear e à formação de profissionais.

Os sistemas podem ser divididos em 3 tipos:

- Educacionais e hobbies (baixo custo) com tecnologia que inclui drivers MCA (Analisador Multicanal), USB, pequenos cristais cintiladores, como CsI(Tl) ou NaI(Tl), miniaturizados, e softwares de código aberto ou inclusos, com valores de até três mil dólares. São utilizados para a física básica e para demonstrações acadêmicas (RAYSID, 2025).
- Intermediários ou portáteis de campo com tecnologia que inclui detectores de cintilação de NaI(Tl) ou BGO de maior volume, integrados a GPS e sistemas de comunicação para acoplamento a drones ou veículos. Seus valores chegam a quinze mil dólares e são utilizados para mapeamento de solo e mineração (MEDUSA-RADIOMETRIC, 2025).
- Alta resolução, que utiliza detectores semicondutores e fornece a resolução máxima necessária para identificar fotopicos complexos e muito próximos. Incluem custos adicionais obrigatórios, como criostatos e sistemas de resfriamento contínuo (por nitrogênio líquido ou elétricos/criogênicos, livres de LN2), e um castelo de blindagem pesada de chumbo para mitigar a radiação de fundo. Junto aos softwares analíticos dedicados e homologados, o conjunto total pode chegar a sessenta mil dólares (RAYSID, 2025).

Este trabalho utilizou como referência e para comparações, um sistema tradicional de aquisição de dados através de um detector cintilador NaI(Tl) acoplado a uma fonte de alta voltagem que avalia uma fonte de Cobalto-60 com atividade de 6,1 kBq. Na Figura 2, observam-se os módulos acoplados ao sistema, nos quais toda a eletrônica associada é tecnologia importada, desde o detector até o *software* de ajuste de curvas e o espectro do Cobalto-60 que será comparado.

Figura 2. Detector cintilador e os componentes de um sistema espectrométrico tradicional



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

2.2 HIPÓTESES

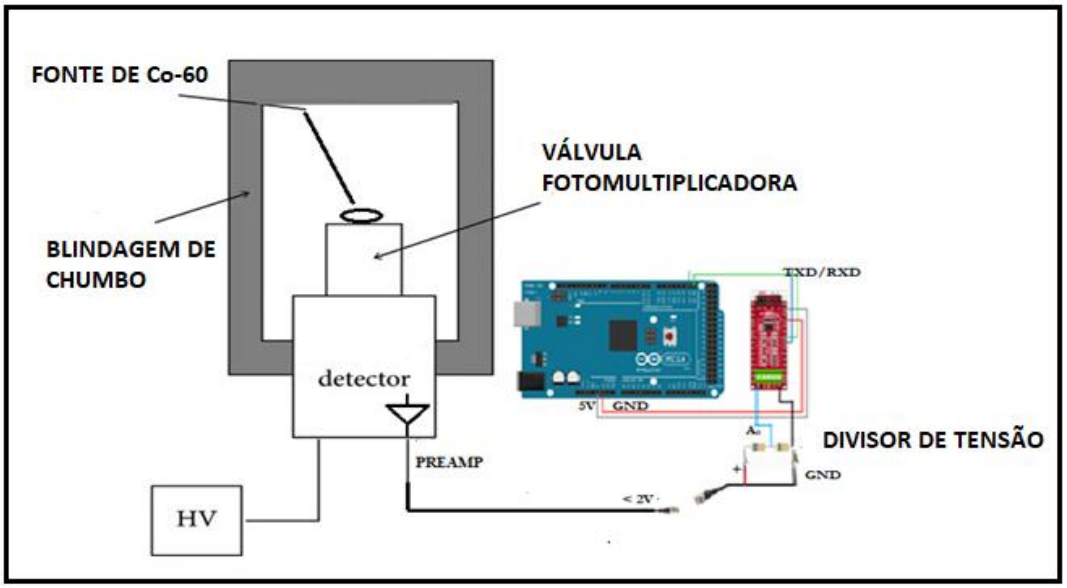
As hipóteses de trabalho orientam os procedimentos para evitar divergências na utilização dos seis conjuntos de *hardwares*, aplicativos e códigos. Busca-se uma relação entre otimização, redução de custos e processamento dos dados espectrométricos.

- Hipótese 1 - A velocidade de adaptação dos dispositivos de baixo custo é maior do que a evolução das tecnologias restritas às grandes corporações.
- Hipótese 2 - A cooperação entre diferentes áreas tecnológicas através das redes equilibra as diferenças técnicas entre as instrumentações.
- Hipótese 3 - É possível uma mudança de paradigmas através das novas tecnologias.

3 METODOLOGIA

Os estudos envolveram uma metodologia que abordou as novas tecnologias 4.0 e 5.0, além de hipóteses que relacionam suas relações e evoluções, com o objetivo de determinar a atividade e os picos característicos de uma fonte de Cobalto-60. Na Figura 3, observa-se a placa embarcada com um microcontrolador que possui instruções que incluem uma janela de tempo para o pulso analógico, não necessitando de sistemas operacionais para a aquisição e podendo transmitir os dados sem cabeamento, o que reforça a ideia de segurança em relação à fonte radioativa.

Figura 3. Adaptação de placa e conversor analógico-digital à saída do detector.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

Para otimizar custos, processamentos e volumes de equipamentos, essas configurações, apresentadas na Tabela 1, foram adaptadas ao detector cintilador instalado no LNMRI/IRD. Substituindo os amplificadores, analisadores de canais, sistemas operacionais e aplicativos estatísticos nativos importados, buscou-se comparar os dados adquiridos com esses sistemas inovadores aos já estabelecidos na plataforma original.

Tabela 1. Conjuntos e configurações utilizados com microcontroladores e ADCs.

HARDWARE	ADC INT(A)	ADC EXT(B)
1 Giga R1	12 BIT	12 BIT
2 Raspberry	NÃO	12/24 BIT
3 Due	12 BIT	16 BIT

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

Na Tabela 1, cada sistema embarcado pode ser combinado a um conversor analógico-digital (ADC) interno ou externo, produzindo um conjunto de seis dados de aquisição que serão agrupados em códigos abertos de gerenciamento serial e de processamento *open-source* de *big data* (Pandas/Python), conforme a Figura 4. Pode-se dizer que o procedimento tem uma fase inicial, com *hardware* e componentes eletrônicos adaptados, e uma segunda fase de depuração dos dados espectrométricos através dos códigos abertos às comunidades interconectadas.

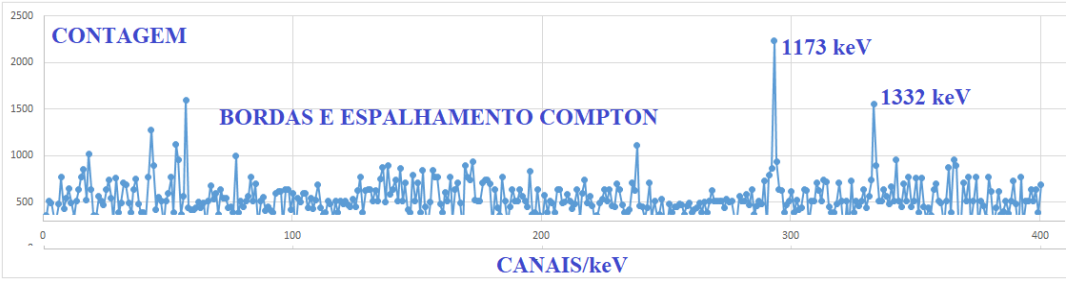
Figura 4. Dados seriais com controle de fluxo de hardware, tratamento e armazenamento de dados.



Fonte: Elaborada pelos autores

Após a digitalização dos pulsos analógicos do detector cintilador e o processamento por meio de aplicativos de gerenciamento de dados e ajustes estatísticos, os histogramas de contagem das fontes radioativas podem ser apresentados em um documento espectrométrico que mostra os principais picos de energia para uma primeira avaliação qualitativa do método, Figura 5.

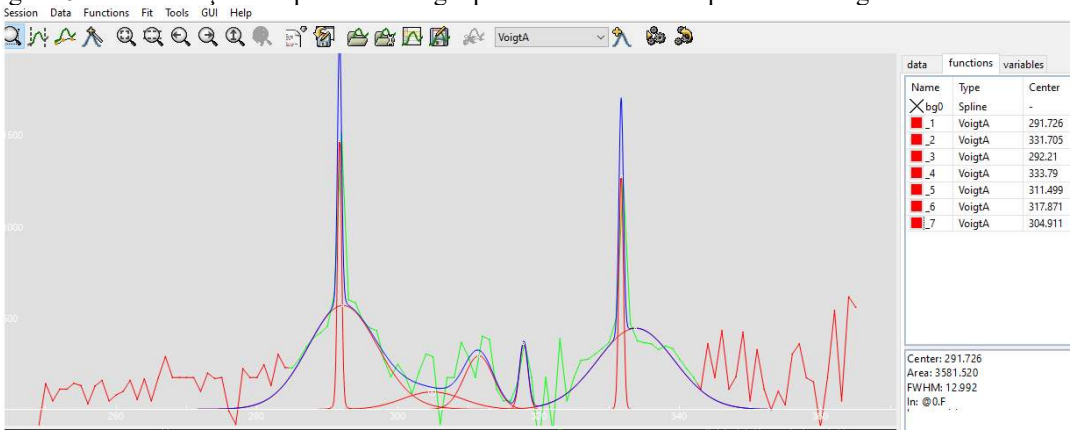
Figura 5. Histogramas de contagem formando picos de energia para análise qualitativa e comparativa à Figura 2.



Fonte: Elaborada pelos autores

Para uma avaliação quantitativa através da atividade rastreada da fonte de Cobalto-60 com atividade de 6,1 kBq, utilizou-se os dados brutos armazenados diretamente na memória *flash*, sem necessidade de sistema operacional, por meio de métodos estatísticos em *software* de ajustes de curvas com distribuição livre. As áreas livres calculadas são utilizadas como contagem na equação 1 da espectrometria de gama, conforme os parâmetros adotados pelos principais laboratórios de pesquisa do mundo. A figura 6 mostra o último procedimento, conhecido como deconvolução dos picos gaussianos, por meio de métodos de ajustes estatísticos Voigt.

Figura 6. Deconvolução dos picos de energia para calcular a área líquida de contagem abaixo da curva.



Fonte: Elaborada pelos autores

Para o cálculo da atividade da fonte, equação 1, utilizam-se os parâmetros metrológicos rastreados à geometria de aquisição do laboratório, Tabela 2, junto aos valores de contagem dos seis conjuntos acoplados ao detector separadamente em intervalos de vinte minutos. Esses grupos de dados avaliam a aderência dos resultados, demonstrando qual conjunto minimiza a variação em torno do valor de referência da atividade rastreada (GILMORE, 2008).

$$A = \frac{C}{i.\xi.t.F} \qquad (1)$$

Onde:

A = Atividade em kBq

C = Contagem do pico de energia em 20 minutos de aquisição

Pɣ(i) = intensidade da emissão do pico considerado

t = tempo de aquisição de 20 minutos para cada conjunto

F = Fator de conversão que neste trabalho vale 1

ξ = Eficiência de detecção

Tabela 2. Parâmetros espectrométricos para os picos do Cobalto-60.

PICO DE ENERGIA	P ɣ(i)	Eff
1173 keV	**0,9985**	**0.044845**
1333 keV	**0,9998**	**0,039750**

Fonte: LNMRI (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS

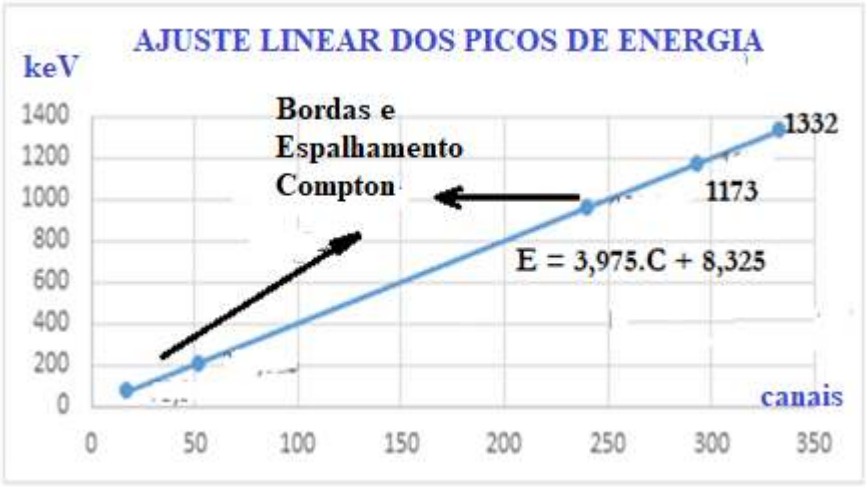
A avaliação qualitativa dos resultados está baseada na análise dos dois picos de energia característicos do Cobalto-60 que estão em torno de 1173 keV e 1332 keV. As figuras 2 e 5 mostram a convergência inicial entre os documentos espectrométricos.

Para o detector cintilador e sua válvula fotomultiplicadora, a relação entre a energia depositada em MeV e a altura do pulso de saída no tubo fotomultiplicador (PMT), em milivolts, tem proporcionalidade em faixas de energias típicas dos raios gama, porém o fator de conversão não é uma constante fundamental e fixa.

Estes parâmetros variáveis do sistema dependem da energia de incidência, da taxa de conversão óptica do cristal, da eficiência de coleta de cargas e do ganho dos díodos da válvula. Para cada energia do pico avaliada, uma janela de 400 MeV a 1000 MeV pode ser encontrada através da calibração em energia.

Com estes dados, torna-se possível conhecer as posições dos picos de energia no espectro e suas localizações pelos canais referentes a esses valores. O problema é que, em geral, o sistema de aquisição necessita de ajuste linear. Entre os picos de 70 a 1000 keV e de 1000 a 2500 keV, os canais podem ter variações entre 3,5 a 4 keV, em média, o que pode ser corrigido com um ajuste através das energias conhecidas, como descrito na figura 7.

Figura 7. Calibração em energia do Cobalto-60 no detector NaI(Tl).



Fonte: Elaborada pelos autores

Considerando a análise quantitativa através da atividade da fonte, observou-se inicialmente a contagem das áreas abaixo dos picos de energia deconvoluídos e o valor calculado dessa atividade na equação 1, junto aos parâmetros da Tabela 2.

Os dados obtidos do sistema composto por detector cintilador acoplado às placas embarcadas são inicialmente “brutos”, devido à baixa amplificação na válvula fotomultiplicadora. Seus pulsos analógicos de saída não superam 1 V e a digitalização é feita com impedâncias adaptadas entre o detector e as seis placas embarcadas. Na Tabela 3, tem-se as áreas das contagens abaixo das curvas deconvoluídas no aplicativo de ajustes estatísticos.

Tabela 3. Áreas de contagens abaixo da curva deconvoluída em cada conjunto utilizado.

CONJUNTOS	Contagem (C) no pico de energia(1173 keV)	Contagem (C) no pico de energia(1332 keV)
GIGA+12BIT (INT)	3588 (1A)	3376 (1A)
GIGA+12BIT (EXT)	3616 (1B)	3394 (1B)
RASP+12BIT (EXT)	3627 (2A)	3398 (2A)
RASP+24BIT (EXT)	3635 (2B)	3412 (2B)
DUE+12BIT (INT)	3581 (3A)	3369 (3A)
DUE+16BIT (EXT)	3608 (3B)	3380 (3B)

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

Para verificar a aderência dos dados avaliou-se a dispersão no resultado em torno do valor de referência (AR), em relação à atividade calculada (AC) no laboratório nacional, e este erro relativo pode ser visto na tabela 4 para os dois principais picos de energia do Cobalto-60.

Tabela 4. Dispersões da atividade AR = 6,1 kBq nos seis conjuntos para os dois picos de energia.

Conjunto	A_c(1173 keV)	E_{rel}	A_c(1332 keV)	E_{rel}
	$Ac = \frac{C}{i.\xi.t.F}$ kBq	$\frac{A_R - A_C}{A_R}$ %	$Ac = \frac{C}{i.\xi.t.F}$ kBq	$\frac{A_R - A_C}{A_R}$ %
1A	5,806	6,1	5,812	5,6
1B	5,793	5,2	5,788	5,2
2A	5,763	5,0	5,779	5,1
2B	5,776	4,8	5,758	4,7
3A	5,731	6,2	5,751	5,8
3B	5,720	5,5	5,739	5,5

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

4.2 DISCUSSÕES

As redes que compartilham experiências ou ecossistemas colaborativos, atualizaram essas tecnologias mais simplificadas com velocidade superior às tecnologias já estabelecidas, projetando uma mudança de paradigmas tecnológicos em ciclos cada vez menores.

Os dados direcionam às discussões, tanto em relação às hipóteses apresentadas abaixo quanto aos dados acumulados.

a) O compartilhamento de informações e conhecimentos nos ecossistemas de inovação tecnológica é mais relevante do que as taxas de atualização desses equipamentos. Como exemplos, as dificuldades encontradas nas leituras iniciais, o grande volume de dados ou os tempos mínimos de aquisição foram resolvidos separadamente em diferentes plataformas de *softwares* e *hardwares*, por meio de experiências compartilhadas pelos usuários.
b) Os problemas técnicos encontrados decorrem da dificuldade de adaptar as modernas placas de baixo consumo de energia aos sistemas já configurados, que operam em níveis de tensão e de corrente diferentes. Algumas variações de leitura devem-se aos ruídos eletrônicos dessas adaptações.
c) Os grandes sistemas espectrométricos que disseminam padrões precisam de tempo para criar "confiança nos dados". Isso diminui a velocidade de adaptação às novas tecnologias, mas garante a rastreabilidade das suas padronizações.
d) Os erros nos dados obtidos podem ser minimizados com maior experiência na adaptação e na evolução dos equipamentos utilizados. Os problemas técnicos, como a impedância do amplificador, as placas externas aos módulos eletrônicos, o tempo de aquisição e os ajustes, podem ser otimizados nas placas utilizadas, sendo o sistema Raspberry Pi 4, com ADC interno e externo, o melhor conjunto para a comparação e a análise inicial dos dados acumulados.

5 CONCLUSÕES

O confronto dos resultados experimentais, entre si e em relação ao valor de referência da atividade, pode ser avaliado pela dispersão e pela homogeneidade dos seis conjuntos de instrumentos. Observa-se que, para a configuração 2B (Raspberry e ADS1256), com o conversor analógico-digital de maior sensibilidade e precisão, o resultado torna-se mais consistente em relação à fonte utilizada.

Como esses conjuntos de placas e componentes eletrônicos são adaptados ao equipamento original, ruídos e a qualidade dos contatos influenciam a aquisição dos dados, o que requer evolução futura nas interconexões e ajustes nos códigos dos microcontroladores.

As hipóteses utilizadas para observar as relações entre inovações tecnológicas e o modo como seu ecossistema de colaboração as aproxima das tecnologias tradicionais se confirmam por meio da velocidade de adaptação instrumental e da rede de compartilhamento de experiências e dados.

As principais conclusões do trabalho são:

• A tecnologia 4.0 permite reproduzir parte das funções de equipamentos que antes dependiam de sistemas fechados e muito caros.

- Na transição para a tecnologia 5.0 essa tendência pode se intensificar, porque a tecnologia passa a enfatizar não apenas automação, mas também colaboração humano-máquina, personalização, sustentabilidade e democratização do acesso ao conhecimento.
- A inovação não substitui equipamentos exclusivos mas pode criar uma quebra de paradigmas ou deslocamento na fronteira tecnológica.

O apoio do LNMRI/IRD a esses estudos reforça a relevância de pesquisas alternativas, devido à capacidade e à infraestrutura do laboratório, que estão alinhadas aos padrões internacionais e inseridas na rede global de metrologia das radiações ionizantes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao grupo de pesquisa do LITCOMP/CBPF pelos materiais de estudo disponibilizados, e às comunidades/fóruns de discussão em torno dos sistemas embarcados utilizados neste trabalho, tanto na parte técnica quanto às hipóteses dos ecossistemas de inovação e colaboração.

FINANCIAMENTO

Esta pesquisa não foi financiada por órgão federal, estadual ou privado.

REFERÊNCIAS

ALIAKSANDR HARTSUYEU. Raysid Wireless Gamma Spectrometer. Disponível em: <https://raysid.com/price.html>. Acesso em:. 12 out. 2025.

ARDUINO. Arduino – Open-source electronics platform. 2023. Disponível em: https://www.arduino.cc. Acesso em: 24 nov. 2025.

BAHOO, S., CUCCULELLI, M., & QAMAR, D., Artificial intelligence and corporate innovation: A review and research agenda. Technological Forecasting and Social Change, 2023, 188, 122264.

BRAY, Freddie *et al.* Global cancer transitions according to the Human Development Index (2008–2030): a population-based study. The Lancet Oncology, v. 13, n. 8, p. 790–801, ago. 2012.

challenges of A.I.A.I. in the construction industry, Journal of Open Innovation : Technology, Market, and Complexity, 2022, p.45

GILMORE, G. Practical Gamma-Ray Spectrometry. 2nd ed. Chichester, England

Hoboken, NJ: Wiley, 2008.

Home - Gathering for Open Science Hardware. Disponível em: <https://openhardware.science/>. Acesso em: 10 fev.. 2026.

Medusa Radiometrics. Disponível em: <https://www.medusa-radiometrics.com/>. Acesso em: 11 mai.. 2025.

REGONA, M.,YIGITCANLAR, T.,XIA, B.,LI, R.Y.M., Opportunities and adoption Gamaespectrômetro MS-350 MEDUSA. Disponível em: <https://pt.iatecps.com/product-page/gamaespectrometro-ms-350-medusa>. Acesso em: 23 jan. 2026.