

**THE VALUE OF NUCLEAR MEASUREMENT: A TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF  
INDUSTRIAL DENSITY GAUGES****O VALOR DA MEDIÇÃO NUCLEAR: ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DOS DENSÍMETROS  
NA INDÚSTRIA****JULIA VITORIA PIMENTEL DE FREITAS**

<https://orcid.org/0009-0003-0694-6729/juliafrimentel@ufrj.br>  
Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

**MOACIR PORTO FERREIRA**

<https://orcid.org/0000-0002-1913-2762/moacir.ferreira@poli.ufrj.br>  
Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

**MILENA DOS SANTOS DAMASCENO SILVA**

<https://orcid.org/0009-0003-2782-4210/midamasceno.20241@poli.ufrj.br>  
Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

**NATHAN LAURENTINO NEGRI**

<https://orcid.org/0009-0007-5993-0252/nathan.negri@poli.ufrj.br>  
Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

Recebido em: 30/06/2025

Aprovado em: 21/10/2025

Publicado em: 13/11/2025

**RESUMO**

Este artigo apresenta uma análise técnico-econômica dos medidores de densidade nucleares, abordando os fatores que influenciam sua implementação na indústria. Embora consolidados por sua capacidade de realizar medições precisas e não invasivas em condições adversas, a adoção desses equipamentos enfrenta barreiras regulatórias e financeiras. O objetivo deste trabalho é detalhar e quantificar essas barreiras, analisando o processo de licenciamento no Brasil, o custo de aquisição e o panorama do mercado global. A análise demonstra que o investimento inicial para a aquisição de um densímetro nuclear é elevado, somando-se aos custos e processos de licenciamento e regularização conduzidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Em contrapartida, o mercado global para estes dispositivos apresenta perspectiva de crescimento, impulsionado pela demanda por otimização de processos e controle de qualidade em setores estratégicos como a construção civil e a mineração. Conclui-se que, apesar do alto custo de entrada e das exigências de segurança radiológica, os densímetros nucleares possuem um valor agregado que sustenta sua demanda de mercado, tornando a análise de sua viabilidade econômica um fator crítico para a decisão de investimento.

**Palavras-chave:** aplicações industriais nucleares; densímetros nucleares; proteção radiológica; tecnologias nucleares.

**ABSTRACT**

This paper presents a techno-economic analysis of nuclear density gauges, addressing the factors that influence their industrial implementation. Although established for their ability to perform precise, non-invasive measurements under adverse conditions, the adoption of these gauges faces regulatory and financial barriers. The objective of this study is to detail and quantify these barriers by analyzing the licensing process in Brazil, acquisition costs, and the global market landscape. The analysis demonstrates that the initial investment to acquire a nuclear density gauge is high, compounded by the costs and procedures for licensing and regulatory compliance conducted by the Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Conversely, the global market for these devices shows a growth outlook, driven by the demand for process optimization and quality control in strategic sectors such as civil construction and mining. It is concluded that, despite the high entry cost and the radiological safety requirements, nuclear density gauges possess an added value that sustains their market demand, making the analysis of their economic viability a critical factor in investment decisions.

**Keywords:** industrial nuclear applications; nuclear density gauges; nuclear technologies; radiological protection.

**1 INTRODUÇÃO**

As tecnologias que empregam radiação ionizante evoluíram de forma notável, transcendendo suas origens e se consolidando como pilares em áreas tão diversas quanto a medicina de precisão, a segurança global e a indústria moderna. Para além da geração de energia, o domínio nuclear oferece um arsenal de ferramentas para otimização de processos, controle de qualidade e desenvolvimento de novos materiais. Dentro deste vasto universo de aplicações, destacam-se os densímetros nucleares como instrumentos de alta sofisticação, essenciais para o monitoramento industrial.

Dentre esses instrumentos, o medidor de densidade nuclear ocupa uma posição de particular relevância. Sua função primordial é determinar a densidade de materiais de forma contínua, em tempo real e sem contato direto. Essa capacidade o torna uma solução tecnológica indispensável para processos que envolvem substâncias em condições extremas, como altas temperaturas, pressões elevadas, ou materiais corrosivos e abrasivos, onde métodos de medição convencionais se mostram inadequados ou inviáveis. Assim, os densímetros nucleares são fundamentais para garantir a estabilidade e a eficiência em setores estratégicos.

Apesar de sua relevância técnica, a implementação dos densímetros nucleares envolve um conjunto de desafios financeiros e regulatórios que demandam uma análise aprofundada. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é realizar uma análise técnico-econômica desses equipamentos, detalhando os custos associados e o panorama de mercado. Para tanto, o artigo foi estruturado para, primeiramente, explorar os princípios físicos e as aplicações que fundamentam o valor da tecnologia. Em seguida, a análise se aprofunda nos aspectos regulatórios e econômicos,

abordando o processo de licenciamento no Brasil, os custos de implementação e a dinâmica do mercado global, a fim de oferecer uma visão estruturada sobre a viabilidade de sua adoção.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Desde a descoberta do raio X por Roentgen, as tecnologias nucleares atravessam um contínuo processo de aprimoramento, ramificando-se em aplicações cada vez mais sofisticadas. Segundo Arhouni (2025), um exemplo proeminente dessa evolução é a sua integração com a inteligência artificial (IA), onde algoritmos de machine learning e deep learning são aplicados para otimizar parâmetros de reatores nucleares, antecipar falhas em equipamentos e controlar a estabilidade do plasma em reatores de fusão. Tais avanços visam não apenas a maximização da eficiência e da segurança operacional, mas também a automação de respostas a cenários de emergência, consolidando um paradigma de gestão nuclear mais robusto e preditivo.

Essa sofisticação, contudo, não se restringe ao setor energético. A vastidão do uso dessas tecnologias manifesta-se em campos tão distintos quanto a medicina de precisão e a segurança global. Na cardiologia nuclear, técnicas de imagem como SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*) e PET (*Positron Emission Tomography*), aliadas a novos radiofármacos, permitem uma estratificação de risco acurada para pacientes cardiopatas, ao quantificar o fluxo sanguíneo miocárdico e detectar microcalcificações vasculares preditivas de infarto (Gimelli, 2025). Paralelamente, Shubayr (2024) argumenta que no âmbito da segurança, tecnologias emergentes são empregadas para combater o tráfico ilícito de materiais radioativos por meio de sistemas de monitoramento inteligentes e técnicas de forense nuclear, que possibilitam a identificação e rastreabilidade de fontes de radiação, reforçando a cooperação internacional contra ameaças nucleares.

Para além das aplicações de alto impacto na saúde e na segurança, as tecnologias nucleares desempenham um papel igualmente multifacetado e crucial na indústria moderna, sendo empregadas para identificar e avaliar as propriedades de materiais, medir níveis de poluição, esterilizar componentes e otimizar processos. Entre as aplicações mais consolidadas estão os ensaios não destrutivos por meio da radiografia industrial, que permitem inspecionar a integridade de soldas, tanques de armazenamento e elementos estruturais, identificando fissuras ou falhas não visíveis e se tornando uma ferramenta chave para o controle de qualidade e segurança (IAEA, 2024).

Outra aplicação de grande impacto é a esterilização por irradiação, um método seguro e de baixo custo responsável por tratar mais de 40% dos dispositivos médicos de uso único no mundo, como seringas e luvas, com a vantagem de poder ser realizado com os produtos já embalados. Adicionalmente, os radiotraçadores ganha cada vez mais importância para diagnosticar causas de ineficiência e otimizar operações em plantas industriais, apresentando uma excelente relação custo-benefício (IAEA, 2024).

Ainda nesse contexto de monitoramento e otimização de processos, uma ferramenta de particular relevância são os medidores nucleares, com destaque para os densímetros. Esses equipamentos operam de forma não invasiva, utilizando uma fonte de radiação e um detector para aferir continuamente e em tempo real a densidade de materiais em fluxo, como polpas de minério em tubulações ou produtos em uma linha de processamento. Por não exigirem contato direto com o material e serem robustos a condições adversas de temperatura e pressão, os densímetros nucleares são indispensáveis para a automação e o controle preciso em setores como mineração, dragagem e na indústria de alimentos, garantindo a consistência e a qualidade do produto (IAEA, 2024).

O funcionamento de um medidor de densidade por radiação baseia-se na interação da radiação ionizante com a matéria, fenômeno cuja compreensão exige o domínio dos conceitos de radiação e atenuação. No livro Radioproteção e Dosimetria, Tauhata (2013) classifica radiação ionizante como partículas ou fótons com energia suficiente para ionizar átomos ao interagir com a matéria. Os principais mecanismos de interação entre fótons e materiais são o efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton e a produção de pares, cuja predominância depende da energia dos fótons e do número atômico do material. A atenuação é descrita pelo coeficiente de atenuação linear total, que resulta da soma dos coeficientes de cada mecanismo. A intensidade da radiação decresce exponencialmente com a espessura do material, e para comparações utiliza-se também o coeficiente de atenuação em massa, que considera a densidade. Esses conceitos são essenciais para aplicações em radioproteção, diagnóstico por imagem e radioterapia.

É com base nesses princípios fundamentais de interação e atenuação que operam os medidores nucleares. Esses instrumentos utilizam radiações ionizantes, como beta, gama ou raios X, para determinar a densidade de materiais de forma não destrutiva e sem contato direto. Eles fazem parte de um grupo de dispositivos amplamente usados em processos industriais modernos para controle de qualidade e monitoramento contínuo. Por não exigirem contato físico com o

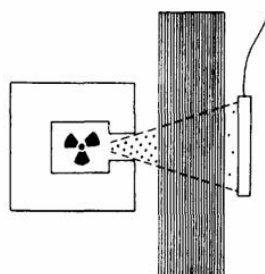
material analisado, esses aparelhos são ideais para medir substâncias em movimento rápido, com temperaturas extremas, propriedades químicas perigosas ou em embalagens fechadas. A radiação atravessa o material e é parcialmente absorvida conforme sua densidade; o detector então mede a quantidade de radiação que passou e, com isso, calcula a densidade. Importante destacar que esse processo não altera nem danifica o material avaliado. A depender da configuração geométrica entre a fonte de radiação e o detector, esses equipamentos podem ser classificados em diferentes tipos, cada um com aplicações específicas (IAEA, 1996, p. 7).

## 2.1 Tipos de Densímetros Nucleares

### 2.1.1 Transmissão

Um arranjo baseado na atenuação de radiação ao atravessar um meio material. Nessa configuração, a fonte radioativa e o detector são posicionados em lados opostos do material a ser monitorado. A intensidade da radiação detectada é inversamente proporcional à densidade ou à espessura do meio. Assim, variações na densidade resultam em alterações no nível de atenuação observado, permitindo o monitoramento preciso de fluidos em tubulações ou o nível de enchimento em tanques. Alternativamente, quando a densidade permanece constante, o sistema permite medir variações geométricas, como a espessura de chapas, sendo amplamente empregado em processos industriais contínuos (IAEA, 1996, p. 8).

Figura 1 – Esquema de funcionamento de um densímetro de transmissão



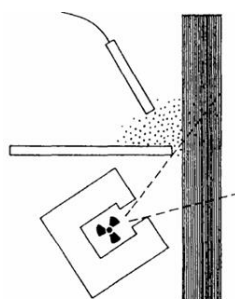
Fonte: *International Atomic Energy Agency* (1996, p.8)

### 2.1.2 Retroespalhamento (*backscatter*)

Diferentemente da configuração por transmissão, o medidor por retroespalhamento (*backscatter*) opera com a fonte e o detector posicionados do mesmo lado do material em análise,

sendo o detector blindado contra a radiação primária. A radiação penetra parcialmente no material e interage com seus átomos, produzindo radiação secundária que é retroespalhada em direção ao detector. A intensidade dessa radiação dispersa é função direta da densidade ou espessura do material. A escolha criteriosa da fonte permite a adaptação do equipamento a diferentes aplicações, sendo especialmente sensível à presença de elementos leves com radiações gama ou X. Quando empregada radiação de nêutrons, a resposta do detector pode indicar a concentração de hidrogênio, técnica empregada em medições de umidade e porosidade em setores como papel e celulose e geologia (IAEA, 1996, p. 11).

Figura 2 – Esquema de funcionamento de um densímetro de retroespalhamento (*backscatter*)



Fonte: *International Atomic Energy Agency* (1996, p. 10)

### 2.1.3 Fluorescente

Uma terceira categoria de densímetros nucleares, o tipo fluorescente, opera por um princípio distinto, baseando-se na interação seletiva entre radiações de baixa energia e elementos específicos do material, promovendo a emissão de radiação fluorescente característica. A detecção desses fótons permite identificar qualitativa e quantitativamente os elementos presentes, sendo aplicado na análise de minérios, ligas metálicas e na medição da espessura de revestimentos. Quando acoplado a geradores de nêutrons de alta energia, o sistema pode induzir a ativação de núcleos estáveis, cuja emissão gama subsequente possibilita a identificação de compostos em atividades como a prospecção de petróleo (IAEA, 1996, p. 12).

Os instrumentos de medição utilizam diferentes radionuclídeos emissores de radiação ionizante, cuja escolha está diretamente relacionada à aplicação desejada e às propriedades do material a ser analisado. Fontes beta, como Promécio-147 e Estrôncio-90, são empregadas em medições de materiais leves como papel e têxteis, devido à sua baixa penetração. Por outro lado,

fontes gama, como Amerício-241, Césio-137 (Cs-137) e Cobalto-60, caracterizam-se por sua elevada capacidade de penetração e são indicadas para aplicações que envolvem materiais de maior densidade, como aço e estruturas refratárias. Em sistemas fluorescentes, utilizam-se radiações capazes de induzir fluorescência ou ativação nuclear para identificação elementar. As atividades típicas variam de MBq a GBq, conforme as exigências do processo industrial (IAEA, 1996, p. 9-12).

## 2.2 Acurácia e medidas de segurança

A sensibilidade do sistema de detecção do gama densímetro, aliada a um processo de medição padronizado, resulta em leituras de alta precisão e uniformidade. Essa característica o torna tecnicamente superior a métodos convencionais na determinação *in situ* da densidade e umidade do solo, conforme evidenciado pela baixa dispersão dos resultados apresentada por Barbosa (2023). Por essa razão, o equipamento é considerado uma ferramenta de alta confiabilidade para o controle tecnológico rigoroso da compactação em grandes obras de infraestrutura.

Contudo, a elevada precisão e eficácia desses dispositivos, como supracitado, vêm acompanhadas de responsabilidades, pois seu uso envolve riscos radiológicos que exigem avaliações de segurança. Esse processo inclui a análise detalhada das taxas de dose, a estimativa da exposição de trabalhadores e do público em condições normais e de incidentes, e a definição de limites operacionais seguros. A avaliação deve abranger falhas potenciais, fatores externos e erros humanos. Qualquer modificação nos equipamentos deve ser precedida por uma análise técnica, e a gestão segura envolve a atribuição formal de responsabilidades e o monitoramento sistemático da exposição (IAEA, 2022, p. 9).

Para materializar essas avaliações de segurança e garantir o cumprimento das normas no Brasil, a operação de dispositivos como os medidores nucleares está sujeita à autorização da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (2024), órgão responsável pelo licenciamento e fiscalização. Para obter a licença, a instalação deve instituir um Serviço de Proteção Radiológica (SPR) com um supervisor certificado. Compete ao SPR elaborar um Plano de Proteção Radiológica, classificar a instalação, inventariar as fontes, identificar os indivíduos expostos e descrever todos os equipamentos e medidas de segurança. Esse documento, assinado pelos responsáveis, deve ser mantido atualizado durante toda a vigência da operação.

## 2.3 Aplicações industriais

Segundo Ashrapov (2020), os densímetros nucleares são amplamente utilizados em setores industriais que exigem medições precisas e contínuas da densidade de materiais em ambientes fechados e de difícil acesso, como na mineração, metalurgia e na indústria petroquímica e de gás natural. Um exemplo prático é a aplicação na linha tecnológica da *Navoi Mining and Metallurgical Combine*, onde os densímetros foram calibrados em laboratório com simuladores líquidos e utilizados para medir a densidade da emulsão de polpa mineral, essencial para otimizar o processo de separação e tratamento de minérios. Já na indústria petroquímica, os medidores de nível radioisotópicos da *Berthold Technologies GmbH* foram empregados na planta de produção de polietileno do complexo *Uz-Kor Gas Chemical*, no monitoramento do nível de produtos intermediários em pó em tanques fechados. Esses equipamentos operam com fontes de radiação gama, como o Cs-137, e funcionam com base na atenuação da radiação, permitindo medições sem contato direto, o que é ideal para ambientes com alta temperatura, pressão ou presença de substâncias corrosivas e tóxicas.

Para além do monitoramento de materiais em fluxo contínuo nos processos industriais, os densímetros nucleares desempenham um papel igualmente fundamental no controle tecnológico de obras geotécnicas e de pavimentação, onde seu uso consiste em medir a densidade e umidade de solos e agregados em campo. Um exemplo dessa aplicação é o *EGauge Model 4590*, desenvolvido pela *Troxler Electronic Laboratories* (2015), que utiliza uma fonte de Cs-137 para emitir radiação gama através do solo. Ao ser inserido em um furo no terreno, o equipamento mede a atenuação da radiação, que está diretamente relacionada à densidade do material. Essa tecnologia é especialmente valiosa em obras rodoviárias e barragens, onde a compactação adequada é essencial para garantir a estabilidade das estruturas. Por ser um método não destrutivo, portátil e com leitura em tempo real, o densímetro nuclear proporciona agilidade e precisão na verificação dos parâmetros do solo, otimizando o controle de qualidade. O modelo *EGauge 4590* ainda conta com GPS integrado e interface digital, facilitando o registro e o georreferenciamento das medições.

Figura 3 – Modelo *EGauge 4590*



Fonte: *Troxley* (s.d.)

A evolução desses instrumentos permitiu também o desenvolvimento de sistemas que transcendem a medição de densidade, focando em análises composicionais com alta especificidade. É o caso do gama densímetro *InlineSens* da empresa *Berthold* (2025), que se distingue por empregar fontes de radiação gama de baixa energia, como o Amerício-241, para uma análise sensível a variações no número atômico dos elementos. Isso permite a detecção de alterações de concentração mesmo em misturas cuja densidade se altera minimamente. Tal capacidade viabiliza sua aplicação em um vasto leque de setores, como no monitoramento da concentração de sacarose na indústria açucareira, na medição do teor de cinzas em polpas de papel, no controle de sistemas de dessulfurização de gases em usinas de energia, e na formulação de ácidos na indústria química, estabelecendo-se como uma ferramenta de alta precisão para a otimização de processos.

### 3 METODOLOGIA

Para a realização do presente estudo, a metodologia empregada consistiu em uma pesquisa bibliográfica e documental. A pesquisa foi fundamentada na compilação e análise de diferentes tipos de publicações, incluindo artigos científicos, normas, manuais técnicos, legislação e relatórios de mercado. O objetivo foi coletar dados sobre os fundamentos técnicos dos densímetros nucleares, os requisitos para seu processo de licenciamento no Brasil e as informações econômicas sobre custos de aquisição e o panorama do mercado global. A seguir, são detalhadas as etapas da pesquisa.

#### 3.1 Pesquisa bibliográfica de documentos técnicos e científicos

Na fase inicial da pesquisa, foi realizado um levantamento bibliográfico para construir a fundamentação teórica sobre a tecnologia dos densímetros nucleares. A busca incluiu uma variedade de fontes como manuais técnicos da IAEA, artigos de periódicos científicos, revisões de livros, trabalhos acadêmicos e documentos técnicos de fabricantes. Esta etapa teve como finalidade descrever os princípios de funcionamento, os tipos de medidores e suas principais aplicações industriais.

Tabela 1 – Documentos técnicos

<b>Título/Nome</b>	<b>Autor/Fonte</b>	<b>Ano</b>	<b>Tipo de Documento</b>
<i>Manual on nuclear gauges: incorporating applications guide, procedures guide, basics guide</i>	IAEA	1996	Manual
<i>EGauge Model 4590 Application Brief</i>	<i>Troxler Electronic Laboratories</i>	2015	Documento Técnico
<i>Book review: Handbook of Generation-IV Nuclear Reactors, by Igor Pioro</i>	RIZNIC, J. R. ( <i>Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science</i> )	2017	Revisão de Livro
<i>Radiation safety in the use of nuclear gauges: in a nutshell</i>	IAEA	2022	Norma
Análise comparativa dos métodos de medida de densidade do solo: um estudo de caso na transposição do Rio São Francisco	BARBOSA, Maria Gabriele Lemos	2023	Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
Guia para o licenciamento de instalações radiativas na prática Medidores Nucleares	Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)	2024	Guia
<i>Nuclear security measures: a review of selected emerging technologies and strategies</i>	SHUBAYR, Nasser ( <i>Journal of Radiation Research and Applied Sciences</i> )	2024	Artigo de Periódico Científico
<i>Artificial intelligence-driven advances in nuclear technology: exploring innovations, applications, and future prospects</i>	ARHOUNI, F. E. et al. ( <i>Annals of Nuclear Energy</i> )	2025	Artigo de Periódico Científico
<i>What is new in risk assessment in nuclear cardiology?</i>	GIMELLI, A. et al. ( <i>Heart Failure Clinics</i> )	2025	Artigo de Periódico Científico

Fonte: Do autor (2025)

### 3.2 Levantamento da documentação regulatória e legal

Em seguida, foram analisados os documentos que regem o licenciamento e a fiscalização de materiais e instalações radiativas no Brasil. Para isso, foi utilizado o guia produzido pela CNEN e as leis brasileiras relacionadas ao licenciamento. O propósito foi compreender os requisitos legais e os custos associados às taxas de licenciamento para a operação de medidores nucleares.

Tabela 2 – Leis e licenciamento

Título descritivo	Ano
Taxa de Licenciamento, Controle e Fiscalização de Materiais Nucleares e Radioativos e suas Instalações – TLC.	1998
Guia para o licenciamento de instalações radiativas na prática Medidores Nucleares	2024

Fonte: Do autor (2025)

### 3.3 Coleta de dados de mercado e custos de aquisição

Para subsidiar a análise econômica, a terceira etapa concentrou-se na pesquisa de dados de mercado e custos. Foram explorados relatórios de empresas de pesquisa de mercado (como *QYResearch* e *Maia Research*), publicações de agências e informações disponibilizadas por fabricantes e fornecedores de densímetros nucleares (como *Troxler*, *Berthold*, *IMAS* e *HMA Lab Supply*). O objetivo foi identificar exemplos de modelos de densímetros disponíveis comercialmente, aplicações industriais, obter estimativas de custo inicial dos equipamentos e analisar o panorama do mercado global, incluindo seu tamanho, projeções de crescimento e principais setores de aplicação.

Tabela 3 – Sites Selecionados

Título/Nome	Fonte	Ano
<i>Industrial applications</i>	IAEA	2024
<i>InlineSENS – Density Measuring Cell</i>	<i>Berthold</i>	2024
<i>Nuclear gauges industry analysis</i>	<i>QYResearch</i>	2024
Densímetro nuclear <i>Troxler</i> 3440	IMAS, S.A.	2025
<i>e–Gauge model 4590 soil density gauge</i>	<i>Troxler Electronic Laboratories</i>	2025
<i>MC1 Elite™ - Nuclear Density Gauge</i>	<i>HMA Lab Supply</i>	2025
<i>Nuclear density gauge market</i>	<i>Maia Research</i>	2025

Fonte: Do autor (2025)

### 3.4 Análise e sistematização dos dados

Por fim, as informações coletadas nas etapas anteriores foram analisadas e sistematizadas de forma integrada. Os dados da documentação legal e dos relatórios de mercado foram cruzados para estimar o investimento inicial mínimo para a implementação e operação de um medidor nuclear no Brasil, somando o custo do equipamento às taxas de licenciamento. Adotou-se, portanto, uma abordagem qualitativa e descritiva, que permitiu descrever, explicar e relacionar os aspectos técnicos, regulatórios e econômicos que determinam a viabilidade da adoção dos densímetros nucleares na indústria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Lei nº 9.765 (1998), o licenciamento de instalações radiativas é um processo fundamental para garantir a segurança no manuseio de fontes de radiação ionizante. Dependendo do porte e dos riscos envolvidos, algumas atividades demandam um procedimento de médio nível de complexidade, envolvendo autorizações específicas e análises técnicas.

Aplicando-se essa exigência aos medidores nucleares, fixos ou portáteis, o processo de licenciamento requer a emissão de documentos essenciais: a autorização para operação, a certificação da qualificação do supervisor de radioproteção e, futuramente, a licença para a retirada de operação. Toda a documentação é fundamentada em um Relatório Final de Análise de Segurança, elaborado sob a responsabilidade de um SPR devidamente certificado pela CNEN.

Tabela 4 – Valores das taxas de licenciamento

Autorização para operação	R\$ 3.800,00
Certificação da qualificação do Supervisor de Radioproteção	R\$ 540,00
Autorização para retirada de operação	R\$ 760,00

Fonte: Lei nº 9.765/1998 (1998)

Além da complexidade regulatória e dos requisitos de segurança, a implementação de um densímetro nuclear envolve um investimento financeiro considerável. Levantamentos de mercado, baseados em informações de fornecedores do setor como *Ingenieria Más* (2025) e HMA (2025),

indicam que o preço de partida para esses equipamentos é de aproximadamente US\$ 10.000,00. Este montante, em conversão direta (cotação de junho de 2025), equivale a cerca de R\$ 54.681,00. É importante ressaltar que este valor serve como referência, não incluindo custos adicionais como frete, seguros, impostos de importação e taxas de nacionalização. Somando-se a este valor de aquisição as taxas regulatórias para o licenciamento de médio porte, o investimento inicial mínimo para a implementação e operação legal de um medidor nuclear no Brasil atinge o valor de R\$ 59.021,00.

Apesar do significativo investimento inicial, o cenário para esta tecnologia é promissor em escala global. O mercado de medidores nucleares, que inclui os densímetros, apresenta uma perspectiva de crescimento robusto, projetado para expandir de US\$ 5,675 bilhões em 2023 para US\$ 6,856 bilhões até 2029, a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 3,2%. De forma interessante, esse avanço é impulsionado, em parte, pelos mesmos fatores que demandam o rigoroso licenciamento: a crescente necessidade industrial por medições de alta precisão e o aumento dos próprios requisitos regulatórios de segurança, que favorecem a adoção de tecnologias confiáveis. Contudo, o setor também enfrenta desafios que podem moderar essa expansão, como as próprias regulamentações sobre o manuseio de materiais radioativos e uma potencial escassez de mão de obra qualificada (QYRESEARCH, 2024).

Uma análise do mercado global, feita pela *Maia Research* (2025), revela uma clara segmentação baseada no tipo de radiação empregada, com uma notável hegemonia da tecnologia gama. Os medidores do tipo gama dominaram o setor, respondendo por 61,23% do mercado, o que corresponde a um volume de 20,98 milhões de dólares. A liderança e a maior taxa de crescimento dessa categoria são atribuídas à versatilidade e ao alto poder de penetração da radiação gama, que a torna ideal para uma vasta gama de materiais e condições industriais. Em seguida, figuram os medidores do tipo nêutron, que detinham 15,63% do mercado (5,36 milhões de dólares), sendo aplicados em medições de materiais de alta densidade que exigem penetração profunda. Por fim, os medidores do tipo beta, especializados na análise de materiais mais finos, como filmes e componentes eletrônicos, representaram uma fatia de 7,01% do mercado, com um tamanho de 2,40 milhões de dólares e uma demanda estável em seus nichos específicos.

Essa predominância da tecnologia gama está diretamente ligada à sua ampla aplicabilidade, o que se reflete na diversidade de setores que consomem estes equipamentos. A indústria da construção civil emergiu como o principal mercado de aplicação, com 39,23% de participação e um

volume de 13,44 milhões de dólares, impulsionado pelo uso contínuo no controle de qualidade de grandes obras de infraestrutura. Outros setores industriais relevantes incluem a mineração, com 22,42% do mercado (7,68 milhões de dólares) para otimizar a extração de minérios, e a indústria do petróleo, com 17,49% (5,99 milhões de dólares) para medições em processos de extração e refino. Adicionalmente, um nicho notável é o da arqueologia, que respondeu por 8,72% do mercado, que equivale a 2,99 milhões de dólares (*Maia Research, 2025*).

A forte demanda vinda desses setores, por sua vez, determina a distribuição geográfica do mercado global. Em 2024, a Europa consolidou-se como a maior região em termos de receita, com um mercado de 10,27 milhões de dólares, sustentada pela forte base industrial e rigorosos padrões de qualidade em países como Alemanha, Reino Unido e França. Logo em seguida, os Estados Unidos figuram-se como um mercado chave, com 8,07 milhões de dólares, enquanto a China, com um volume muito similar de 8,02 milhões de dólares, destacou-se como a região de crescimento mais rápido, consequência de sua acelerada industrialização e desenvolvimento de infraestrutura (*Maia Research, 2025*).

## 5 CONCLUSÃO

O presente artigo demonstrou que os medidores de densidade nuclear representam ferramentas de alta sofisticação, cujo funcionamento se baseia em princípios consolidados da física de radiações. A análise detalhada de seus tipos e das fontes radioativas empregadas evidenciou a notável versatilidade desses equipamentos, que são projetados para atender a demandas específicas em setores estratégicos como a indústria de processos (mineração, petroquímica) e a construção civil, onde oferecem medições precisas e não invasivas em condições muitas vezes inacessíveis a outras tecnologias.

Contudo, evidenciou-se que a adoção dessa tecnologia não é trivial. A elevada precisão e confiabilidade dos equipamentos, comprovadas em aplicações de campo, são indissociáveis de um arcabouço de segurança radiológica e de um processo de licenciamento, conforme regulamentado no Brasil pela CNEN. Adicionalmente, a análise econômica revelou um investimento inicial significativo, que engloba tanto o custo do equipamento quanto as taxas regulatórias, constituindo uma barreira de entrada considerável.

Apesar dessas barreiras, a análise de mercado aponta para um cenário global em crescimento, impulsionado pela demanda industrial contínua por controle de processos de alta

performance. A hegemonia da tecnologia gama, a liderança do setor de construção e a distribuição do mercado entre potências industriais como Europa, Estados Unidos e China reforçam a percepção de que os densímetros nucleares são ferramentas essenciais para a economia moderna.

Portanto, conclui-se que os medidores nucleares se consolidam como uma tecnologia de alto valor agregado, cujo sucesso e expansão dependem de um equilíbrio entre inovação tecnológica, viabilidade econômica e segurança. O investimento financeiro e a complexidade regulatória são o contraponto necessário para se obter a precisão e a confiabilidade que somente essa tecnologia pode oferecer em muitas das aplicações da indústria contemporânea.

Apesar de o presente estudo consolidar informações sobre o investimento inicial e o panorama regulatório, a sua elaboração revelou lacunas na literatura. Observou-se uma escassez de publicações dedicadas à análise econômica de densímetros, bem como uma dificuldade em obter informações sobre custos de fabricantes e fornecedores no mercado brasileiro, o que limitou uma análise do cenário nacional. Adicionalmente, a maior parte dos dados disponíveis foca nos custos de aquisição, existindo uma lacuna à análise do custo de ciclo de vida completo do equipamento. Portanto, sugerem-se como trabalhos futuros um mapeamento aprofundado do mercado nacional de densímetros nucleares e um estudo sobre seus custos a longo prazo, incluindo despesas com manutenção, calibração e os custos associados ao descomissionamento e ao descarte seguro da fonte radioativa, fatores críticos para uma análise de viabilidade completa.

## REFERÊNCIAS

ARHOUNI, F. E. *et al.* Artificial intelligence-driven advances in nuclear technology: exploring innovations, applications, and future prospects. **Annals of Nuclear Energy**, [S.l.], v. 213, p. 111151, abr. 2025. DOI: 10.1016/j.anucene.2024.111151.

BARBOSA, Maria Gabriele Lemos. **Análise comparativa dos métodos de medida de densidade do solo**: um estudo de caso na transposição do Rio São Francisco. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cajazeiras, Cajazeiras, PB, 2023.

**BERTHOLD.** InlineSENS – Density Measuring Cell, 2024. Disponível em: <https://www.berthold.com/en-us/process-control/products/density-measurement/inlinesens-density-measuring-cell/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

**BRASIL.** Lei nº 9.765, de 18 de dezembro de 1998. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, estabelece as taxas pelos serviços que especifica e dá outras

providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 dez. 1998. Disponível em:  
[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9765.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9765.htm). Acesso em: 18 jun. 2025.

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR**. Guia para o licenciamento de instalações radiativas na prática Medidores Nucleares. Versão 3.0. Rio de Janeiro: CNEN, fev. 2024.

GIMELLI, A. *et al.* What is new in risk assessment in nuclear cardiology? **Heart Failure Clinics**, Philadelphia, v. 21, n. 3, p. 407–415, 2025.

**HMA LAB SUPPLY**. MC1 Elite™ - Nuclear Density Gauge. [S. l.], © 2025. Disponível em:  
<https://www.hmasupply.com/product/mc1-elite-nuclear-density-gauge/>. Acesso em: 27 jun. 2025.

**IMAS, S.A.** Densímetro nuclear Troxler 3440. [S. l.], © 2025. Disponível em:  
<https://www.ingenieriamas.com/producto/densimetro-nuclear-troxler/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

**INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY**. Industrial applications, 2024. Disponível em:  
<https://www.iaea.org/topics/industrial-applications>. Acesso em: 18 jun. 2025.

**INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY**. Manual on nuclear gauges: incorporating: applications guide, procedures guide, basics guide. Vienna: IAEA, (Practical Radiation Safety Manual, IAEA-PRSM-3, Rev.1), 1996.

**INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY**. Radiation safety in the use of nuclear gauges: in a nutshell. Vienna: IAEA, 2022. (IAEA Safety Standards Series, SSG-58).

**MAIA RESEARCH**. Nuclear density gauge market. Disponível em:  
<https://www.maiareports.com/Industries/nuclear-density-gauge-market/>. Acesso em: 28 jun. 2025.

**QYRESEARCH**. Nuclear gauges industry analysis. Disponível em:  
<https://www.qyresearch.com/news/8066/nuclear-gauges>. Acesso em: 28 jun. 2025.

RIZNIC, J. R. Book review: Handbook of Generation-IV Nuclear Reactors, by Igor Pioro. **Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science**, [S.l.], v. 3, n. 2, p. 026501-1–026501-2, 2017.

SHUBAYR, Nasser. Nuclear security measures: a review of selected emerging technologies and strategies. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, [S.l.], v. 17, n. 1, p. 814–826, mar. 2024. DOI: 10.1016/j.jrras.2023.100814.

**TROXLER ELECTRONIC LABORATORIES**. EGauge Model 4590 Application Brief. AB4590-0715, 2015.

**THE VALUE OF NUCLEAR MEASUREMENT: A TECHNO-ECONOMIC  
ANALYSIS OF INDUSTRIAL DENSITY GAUGES**

JULIA VITORIA PIMENTEL DE FREITAS  
MOACIR PORTO FERREIRA  
MILENA DOS SANTOS DAMASCENO SILVA  
NATHAN LAURENTINO NEGRI

**TROXLER ELECTRONIC LABORATORIES.** e-Gauge model 4590 soil density gauge. [S. D.].  
Disponível em: <https://troxlerlabs.com/egauge-model-4590-soil-density-gauge/>. Acesso em: 28 jun.  
2025.